

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO PARA
UNA MAQUINA DE TRACCIÓN LUMBAR Y CERVICAL



ALEX JULIAN DORADO RODRÍGUEZ

TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
SISTEMAS DE CONTROL PARA ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS
POPAYÁN
NOVIEMBRE DE 2006

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO PARA
UNA MAQUINA DE TRACCIÓN LUMBAR Y CERVICAL

ALEX JULIAN DORADO RODRÍGUEZ

MONOGRAFIA

DIRECTOR: ING. JOSÉ RAFAEL DÍAZ CHÁVEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
SISTEMAS DE CONTROL PARA ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS
POPAYÁN
NOVIEMBRE DE 2006

Nota de aceptación:

Firma del presidente del proyecto

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir con todo lo valioso que hoy tengo, por gozar de mi salud y por tener a mi lado a todos mis seres queridos.

A mi madre Luz Angélica Rodríguez, por apoyarme, por confiar e inculcar en mí todos los valores que me hacen luchar día a día, que me llevan a soñar con un mañana mas prospero, justo y equitativo para todos los hombres, a ella mi amor por siempre.

A mi hermano Diego por acompañarme y apoyarme en este camino hacia el profesionalismo, por mostrarme que todavía es posible forjar un mundo más justo, a él mis mas sinceros respetos.

Al resto de mi familia por tolerarme, respetarme y aceptar todas mis decisiones.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

La Universidad del Cauca, Alma Máter que me acogió durante estos últimos seis años y me formó como el profesional que soy hoy.

José Rafael Díaz Chávez, Ingeniero Electrónico, Profesor de la Universidad del Cauca y Director del trabajo de grado, por sus valiosas orientaciones, por su confianza y por el apoyo en toda la gestión. y desarrollo del trabajo.

La Vicerrectoria de Investigaciones de Unicauca, por la confianza y apoyo económico para el desarrollo del proyecto.

Al Departamento de fisioterapia, por el apoyo en toda la gestión, en especial a Maria Verónica Torres Andrade que apoyó y realizó múltiples gestiones y aportó su tiempo y conocimiento.

RESUMEN

En este documento se presenta el desarrollo e implementación de un accionamiento eléctrico para una máquina de tracción lumbar y cervical útil para tratar enfermedades relacionadas con la columna como lordosis, escoliosis y algias entre otras. Este dispositivo consiste en el control de la tracción sobre alguna parte del cuerpo mediante un motorreductor manejado por un convertidor modo suiche. El sistema es conformado por una estructura mecánica modular y por un sistema electrónico programable con supervisión que lo hacen muy competente comercialmente para afrontar el mercado actual de estos dispositivos.

ABSTRACT: In this document, the development and implementation of a electric drive to lumbar and cervical traction machine is present, useful to treat ailment of spine like scoliosis, ache and another. This application consists in the traction control on body exercising by a geared motor drove by switch mode converters. The system is conform by a modular mechanical structure and a programmable electronic system with supervision that commercially they do them so robust and competent to confront the actual market of those devices.

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN.....	1
0.1 PRESENTACIÓN DEL TRABAJO.....	1
0.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
0.3 IMPORTANCIA DEL TEMA.....	3
0.4 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	3
0.5 OBJETIVOS PLANTEADOS.....	4
0.5.1 Objetivo General.....	4
0.5.2 Objetivos Específicos.....	4
0.6 PRINCIPALES APORTES.....	4
0.7 ESTRUCTURA DEL TRABAJO PRESENTADO.....	5
1. FORMULACION Y DEFINICION DEL PRODUCTO.....	7
1.1 GENERACION DE LA IDEA.....	7
1.2 EVALUACIÓN Y SELECCIÓN.....	8
1.2.1 Fundamentos y Características de operación de la maquina.....	8
1.2.1.1 Fundamento teórico- científico de la tracción.....	8
1.2.1.2 Tipos de tracción terapéutica.....	9
1.2.1.3 Técnica de aplicación.....	10
1.2.1.4 Especificaciones requeridas.....	11
1.2.1.5 Especificaciones Puntuales.....	11
1.2.2 Solución e implementación.....	12
1.2.2.1 Características de Productos existentes:.....	13
1.2.2.2 Características implementadas.....	14
1.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO- BASES TEÓRICAS.....	15
1.3.1 Temática usada.....	15
1.3.2 Fundamento teórico principal- Accionamientos eléctricos.....	16
2. DISEÑO PARA INTERFAZ OPERACIÓN/ COMUNICACIÓN.....	17
2.1 INTERFACES DE MAQUINA:.....	17
2.2 ESTUDIO DE FLEXIBILIDAD Y OPERABILIDAD.....	17
2.3 COMUNICACIÓN DE LA MAQUINA. PROTOCOLOS USADOS.....	18
3. INSTRUMENTACIÓN.....	21
3.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA TRACCION:.....	21
3.1.1 Instrumentos - campo neumático/ hidráulico:.....	21
3.1.2 Instrumentos para el campo eléctrico.....	22
3.1.3 Criterios de selección del reductor.....	23
3.2 ELECCION DEL SENSOR DE FUERZA.....	30
3.3 ARQUITECTURA MECÁNICA DE PRECISIÓN:.....	30
3.4 SISTEMA DE MANEJO DE POTENCIA Y DESPLIEGUE DIGITAL.....	30

3.5 LISTAS Y TABLAS DE INSTRUMENTOS:	30
3.5.1 Piezas Comerciales.	31
3.5.2 Piezas mecanizadas.	32
4. MODELACIÓN DEL CONVERTIDOR MODO SUICHE	33
4.1 DINAMICA DEL CIRCUITO DEL MOTOR.	33
4.2 DINAMICA DE LA MECANICA DEL SISTEMA	34
4.3 DINAMICA DE LA CARGA- DEL CUERPO HUMANO.....	35
4.4 ANALISIS DE LA DINAMICA DEL SISTEMA.....	36
4.5 DISEÑO MATEMATICO- ELECTRONICO DEL CONVERTIDOR MODO SUICHE.....	42
4.5.1 Principio de funcionamiento.....	42
4.5.2 Convertidor AC-DC.	43
4.5.3 Voltajes suministrados por la PPU:.....	46
4.5.4 Corriente suministradas por la PPU:.....	47
4.5.5 Implementación del convertidor modo suiche.	50
4.6 LA PLANTA Y EL SISTEMA DE CONTROL.	57
4.6.1 Definición de la planta.....	59
4.6.2 Descripción de señales.	59
4.6.3 Descripción de bloques.....	60
4.6.3.1 Definición Digital del controlador.	60
4.6.3.2 Retenedor de orden cero.	62
4.6.3.3 El circuito de potencia y el motorreductor.	62
4.6.3.4 El sensor y el amplificador de instrumentación.	62
4.7 EL SISTEMA DE CONTROL.....	64
4.7.1 Calibración del sistema de control.	67
4.7.2 El método del tanteo.	71
4.7.3 Pruebas del sistema de control.....	72
4.8 DIAGRAMAS CIRCUITALES DEL ACCIONAMIENTO.	73
4.8.1 Despliegue de variables. 3 circuitos impresos	73
4.8.2 Amplificador de la señal del sensor.	74
4.8.3 Amplificador de la señal de control.	74
4.8.4 Circuito Principal.....	75
5. MODELACIÓN ARQUITECTÓNICA	76
5.1 USO DE LA HERRAMIENTA CAD.....	76
5.2 MODELACIÓN DE LAS PARTES COMERCIALES:	78
5.2.1 Planos de la celda de carga.....	78
5.2.2 Planos del Motorreductor DC Marca Crouzet ref. 80 898 0.	79
5.3 DISEÑO Y MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA.....	81
5.3.1 La extensión cilíndrica del eje.	82
5.3.2 Rodamientos de la extensión cilíndrica.....	85
5.3.3 Rodamiento del sensor.	87
5.3.4 La fuente de alimentación.....	88
5.4 ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ESPACIOS.	89
5.5 MODELACIÓN DE LAS PARTES FABRICADAS.	92

5.6. DETALLES DE CONSTRUCCION.....	94
5.7 PRESENTACION DEL ACCIONAMIENTO ELECTRICO.....	96
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
6.1 INTRODUCCIÓN	98
6.2 CONCLUSIONES.....	98
6.2.1 Conclusiones de los resultados obtenidos:.....	98
6.2.2 Conclusiones generales del proyecto:	98
6.3 RECOMENDACIONES	99
6.4 BIBLIOGRAFIA	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características del motor 80890 0	25
Tabla 2: Parámetros del motorreductor 80898 011	27
Tabla 3: Piezas comerciales utilizadas en el accionamiento.	31
Tabla 4: Piezas mecanizadas incluidas en el accionamiento.	32
Tabla 5: Características electromecánicas del motor 82890 0	34
Tabla 6: Frecuencias disponibles del MIPIC 18F452 en un cristal de 40Mhz.....	50
Tabla 7: Especificaciones de corte y saturación del TIP 122.....	53
Tabla 8: Especificaciones de saturación del optó-acoplador de referencia 4N28. .	58
Tabla 9: Especificaciones de la celda de carga	63
Tabla 10: Parámetros para seleccionar un rodamiento.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Maquina de tracción y su accionamiento eléctrico.....	2
Figura 2: Segmento de la columna vertebral	9
Figura 3: Modos de operación implementados	12
Figura 4: Tracción modelo Eltrac 439	14
Figura 5: Tracción modelo MICRO T12 -MT12	14
Figura 6: Accionamiento eléctrico - Diagramas de bloques	16
Figura 7: Diagrama de comunicación /operación del sistema de tracción.	19
Figura 8: Trama implementada sobre el estándar de la Norma RS-232.....	19
Figura 9: Trama implementada sobre el estándar de la Norma RS-232.....	20
Figura 10: Comparación de costos de accionamientos AC Y DC.....	23
Figura 11: Curvas par-corriente del motor 82890 0 (24V-Nominal)	26
Figura 12: Curvas par velocidad del motor 82890 0 (Desde 0- 24V) y características fundamentales de la zona de trabajo.	27
Figura 13: Curvas par velocidad del motor 82890 (0-24V-Nominal).	28
Figura 14: Curva Par velocidad nominal del motorreductor 82 898 011	29
Figura 15: Celda de carga de 100 Kg marca BSL.....	30
Figura 16: Combinación PPU –Maquina DC.....	33
Figura 17: Modelo dinámico en diagrama de bloques del motorreductor 82 890 036	
Figura 18: Dinámica del circuito del motor	37
Figura 19: Diagrama de bloques correspondiente a balance de momentos.	39
Figura 20: Constantes del sistema dinámico -balance de momentos	39
Figura 21: Dinámica de la carga	40
Figura 22: Fuerza contraelectromotriz (Va-Voltios) para un ciclo útil del 45%.	41
Figura 23: Velocidad del sistema (Wm) para un ciclo útil del 45%.....	41
Figura 24: Respuesta del sistema para 45 % y 95% de ciclo útil.....	41
Figura 25: Principio básico de la PPU.....	42
Figura 26: Convertidor AC -DC.....	43
Figura 27: Esquema simplificado del transformador.	44
Figura 28: Señal rectificadora y circuito rectificador.....	44
Figura 29: Acción del filtro y filtro en convertidor AC-DC	45
Figura 30: Formas de onda de voltaje en la armadura del motor.....	46
Figura 31: Formas de onda de corriente en el motor.	47
Figura 32: Componentes promedio y de rizado equivalente del motor DC.....	48
Figura 33: Voltaje de rizado en el motor DC. (Valores promedios anulados)	49
Figura 34: Efecto de la frecuencia de suicheo.	51
Figura 35: Variación de la corriente de armadura en función del ciclo útil.	51
Figura 36: Convertidor modo suiche para un motor DC.....	52
Figura 37: Operación de los transistores	53
Figura 38: Excitación de un puente H.	55
Figura 39: Curva par velocidad del motor 82890.	56
Figura 40: Excitación de un puente H y circuito opto-acoplador.	57
Figura 41: Sistema de control digital- Caso general	58

Figura 42: Diagrama de bloques equivalente del accionamiento eléctrico.	60
Figura 43: El amplificador de instrumentos.....	63
Figura 44: Pruebas de lazo abierto.....	65
Figura 45: Diagrama de bloques control de lazo cerrado.....	65
Figura 46: Sistema de control de la tracción.....	66
Figura 47: Respuesta al escalón del sistema lineal equivalente.....	69
Figura 48: Control proporcional para obtener la ganancia y el periodo ultimo.....	69
Figura 49: Prueba de lazo cerrado de un tratamiento intermitente –progresivo	72
Figura 50 Prueba de lazo cerrado de un tratamiento sinusoidal.....	72
Figura 51: Prueba de lazo cerrado de un tratamiento continuo.	73
Figura 52: Esquemático del circuito de despliegue de las variables.	74
Figura 53: Esquemático del amplificador de instrumentación.....	74
Figura 54: Esquemático de la tarjeta de potencia.....	74
Figura 55: Tarjeta principal.....	75
Figura 56: Arquitectura mecánica del accionamiento eléctrico.....	77
Figura 57: Vistas ISO de la celda de carga Marca BSL Sahilices.....	78
Figura 58: Vista plano de la celda de carga – Relevancias.	78
Figura 59: Vistas Plano- celda de carga.	79
Figura 60: Vistas Plano- Motorreductor – Relevancias.....	80
Figura 61: Vistas lateral – motorreductor.....	80
Figura 62: Vistas superior - frontal motorreductor.....	81
Figura 63: Estructura mecánica-Extensión del eje.....	82
Figura 64: El par del reductor - Elección del radio de la extensión cilíndrica.....	82
<i>Figura 65: Extensiones cilíndricas.</i>	<i>83</i>
Figura 66: Extensión cilíndrica -dimensión.....	84
Figura 67: Extensión cilíndrica medidas complementarias -.....	85
<i>Figura 68: Soportes de pie con rodamientos y chapa.....</i>	<i>86</i>
Figura 69 : Soportes de brida con rodamientos y fundición - 4 agujeros.....	86
Figura 70: Soportes de brida con rodamientos y fundición -2 agujeros.....	86
Figura 71: Vista ISO del rodamiento del sensor.....	88
Figura 72: Rodamiento del sensor-Medidas y lista de piezas.....	89
Figura 73: Fuente de alimentación comercial.....	89
Figura 74: Alternativa 1 de la arquitectura sistema mecánico.....	90
Figura 75: Alternativa 2 de la arquitectura sistema mecánico.....	91
Figura 76: Arquitectura del sistema implementada.....	91
Figura 77: Arquitectura del sistema implementada.....	92
Figura 78: Estructura del sistema de tracción –Vista ISO.....	92
Figura 79: Estructura del sistema de tracción –Vista superior.....	93
Figura 80: Interacción entre Motor, celda de carga y rodamientos.....	94
Figura 81: Caja envoltoria-Vista ISO.....	94
Figura 82: Accionamiento eléctrico implementado – Vista ISO- anterior.....	96
Figura 83: Accionamiento eléctrico implementado vista ISO inferior.....	97
Figura 84: Accionamiento eléctrico implementado- vista ISO superior.....	97

LISTA DE ANEXOS

- I. Anexo A: Bases teóricas.
- II. Anexo B: Instrumentación del proyecto.
- III. Anexo C: Manejo y Programación de los dispositivos digitales
- IV. Anexo D: Planos - Estructura mecánica.
- V. Anexo E: Manual de Crouzet.
- VI. Anexo F: CD del proyecto.
 - a. Programa de manejo y Programación de los dispositivos digitales.
 - b. Placas circuitales
 - c. Simulación de Matab.
 - d. Simulación de Solid Edge.
 - e. Programa de supervisión
- VII. ANEXO G: Manual de usuario.

GLOSARIO

Accionamiento: Término usado en el área de maquinas eléctricas para referirse a un sistema compuesto por un controlador, un sensor y una maquina eléctrica.

Afecciones osteoarticulares: Problema relacionado en una articulación ósea.

Algias: Dolor persistente, sordo, por lo general de intensidad moderada que puede ser localizado

CAD: Computer assist Design o diseño asistido por computador.

Ciclo útil (duty cycle): Tiempo durante el cual una señal permanece en su estado alto con respecto a al tiempo en que la misma señal permanece en su estado bajo.

Decúbito supino: Posición del cuerpo humano acostado horizontal donde la espalda esta apoyada sobre alguna superficie.

Escoliosis (Scoliosis): Curvatura lateral de la columna vertebral que se produce con frecuencia en la infancia puede deberse a malformaciones congénitas vertebrales, poliomielitis, displacias esqueléticas, parálisis espastica (contracción involuntaria de músculos) y desigualdad de la longitud de las piernas. Un signo característico de la escoliosis es la diferencia de altura de las caderas a los hombros.

Epigastrio: Región situada cerca del estomago.

Lordosis: Aumento patológico del grado de curvatura de cualquier zona de la columna.

Ortopedia: Rama de la medicina dedicada al estudio y tratamiento del esqueleto, sus articulaciones, músculos y estructuras asociadas.

PPU: Power Processing Unit o unidad de procesamiento de potencia.

VISTA ISO: Perspectiva de 45 ° de 3 vistas de un solido.

0. INTRODUCCIÓN

Este capítulo introductorio tiene como finalidad dar una visión general al lector para abordar este trabajo de grado, presentando una perspectiva de aspectos tales como el problema que se pretende solucionar y la respectiva solución planteada. Otros temas a tratar son los objetivos perseguidos, los principales aportes, y la estructura general de la monografía.

0.1 PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

El presente documento es el resultado del desarrollo del trabajo de grado “Diseño e implementación de un accionamiento eléctrico para una maquina de tracción lumbar y cervical” y requisito para la obtención del título de Ingeniero en Automática Industrial por parte del autor del mismo. Se establece como un trabajo original producto del empeño, el apoyo económico de la Vicerrectoría de Investigaciones de la universidad y la dedicación por parte del autor y el Director de tesis, Ingeniero José Rafael Díaz Chávez, quien durante el desarrollo del proyecto, depositó toda su confianza y ofreció todo su apoyo y conocimiento.

El desarrollo e investigación que en adelante se discutirá trata sobre la implementación de un equipo fisioterapéutico, cuyo nombre técnico es *maquina de tracción lumbar y cervical*. Su función es traccionar el cuerpo afectando regiones de la columna en una posición específica del mismo, como se muestra en la Figura 1-a, mediante un accionamiento eléctrico mostrado en la Figura 1-b y algunos accesorios de conexión como la correa o lona de transmisión, arneses, poleas, camilla, etc. entre el cuerpo humano y el accionamiento. La tarea fundamental discutida en este documento es la creación del accionamiento, teniendo en cuenta que este debe ser fácilmente acoplable a su entorno, para ejecutar los diferentes tratamientos que deben ser aplicados al cuerpo.¹ Para conseguir los resultados obtenidos fue necesario asumir estrategias innovadoras y seguir paso a paso, temáticas enmarcadas por la teoría de diseño y desarrollo de productos que se expondrán estratégicamente a lo largo de este documento.

La creación del producto nace debido a insuficiencias de equipos que permiten prestar servicios de calidad en el gremio de la salud del Cauca, pues la capacidad financiera de nuestras empresas no permite realizar grandes inversiones, debido a costes elevados por transporte y consecución en mercado extranjero. Es por eso que se trabajó en pro de soluciones propias e innovadoras más económicas y ventajosas, pues es el camino para apropiarse del conocimiento y es tecnología

¹ Conferencias de practicas Osteomusculares. Técnicas terapéuticas. F.T MARIA VERONICA TORRES ANDRADE. Docente Universidad Del Cauca.

necesaria para afrontar el mercado global de la nueva era. Así, este desarrollo propio disminuye importación de equipos, aporta a la economía y abre camino hacia nuevos mercados, y además, se muestra como precedente para nuevos desarrollos y fomenta nuevas ideas en los grupos investigativos para iniciarse por nuevos senderos del conocimiento.

Para tener éxito en el desarrollo de estos productos es indispensable la investigación de mercado correspondiente que asegure que un producto satisfaga mayormente las necesidades y facilite todas las tareas que el producto debe proveer.

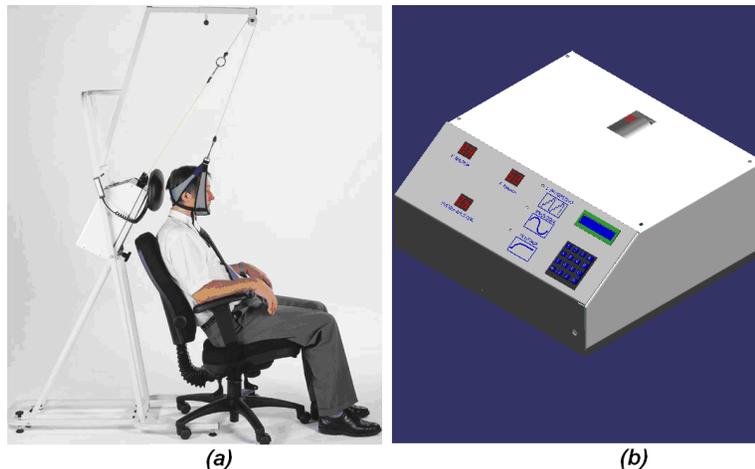


Figura 1: Máquina de tracción y su accionamiento eléctrico

Muchos aspectos fueron tomados en cuenta para decidir la factibilidad y necesidad de la ejecución del proyecto; entre los trabajos por mencionar hay estudios financieros que demostraron que el desarrollo del producto era mucho mas rentable y económico desde un punto de vista financiero, que productos similares ofrecidos en el mercado, como además permitiría la posibilidad de diseñar condiciones de operatividad mas acordes a las necesidades locales.²

La solución operativa finalmente implementada fue la sugerida por el Departamento de Fisioterapia.

0.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El área de la salud en nuestra región carece de medios y herramientas optimas de ayuda y asistencia para procedimientos cuyo objeto es mejorar la calidad de vida

² Proyecto de Automatización I y II: Diseño e implementación de un Accionamiento Eléctrico para una Máquina de Tracción Lumbar y cervical.

de las personas; por eso el desarrollo de productos nuevos o mejorados es un campo que debe ser necesariamente abordado, especialmente por las universidades, con la suficiente seriedad y compromiso para obtener éxito en los propósitos que le corresponde como alma máter. De entre la gran variedad de propósitos y roles es imperativo hacer énfasis en la investigación y desarrollo orientada a la creación de estas herramientas. Para lograrlo se hace necesario la formulación de proyectos, generación de bases científico-tecnológicas y finalmente lo más importante, prioridad para implementación de proyectos indispensables para mejorar la calidad de vida.

Específicamente nuestra universidad en su facultad de medicina área de fisioterapia carece de medios para suplir las necesidades en cuestión de equipos para prácticas fisioterapéuticas. Entre los mas importantes recursos ausentes es un equipo denominado tracción terapéutica, muy útil para su laboratorio e importante para el proceso de aprendizaje.

0.3 IMPORTANCIA DEL TEMA

Con resultados de proyectos importantes desarrollados en el área de la salud, es posible impactar y cubrir socialmente las necesidades de la región. Además estos proyectos de ingeniería biomédica contribuyen con investigaciones para llevar a cabo nuevas ideas que los complementan o que los necesitan como base para otros importantes procesos de innovación en la investigación.

0.4 SOLUCIÓN PROPUESTA

Iniciar con la creación y evaluación del proyecto de investigación de la maquina de tracción lumbar y cervical, importante en el campo de la medicina a partir de sinergia entre los entes involucrados de la universidad.

Se afronta este desarrollo con las temáticas de las maquinas eléctricas DC y su control por convertidores modo suiche, con base a sus características lineales de funcionamiento, esta combinación es precisa para conseguir el control del par o de fuerza que necesita la aplicación a diseñar. Adicionalmente se diseña el equipo con otras importantes características de operatividad en su interfaz de operación y de comunicación.

La metodología y el plan de trabajo es inicialmente la implementación del equipo y posteriormente programar el periodo de prueba de todo el sistema implementado por los operarios directos que son específicamente el personal del área de la salud.

0.5 OBJETIVOS PLANTEADOS

El objetivo fundamental del trabajo es obtener un desarrollo original tangible de un accionamiento eléctrico-electrónico, acudiendo a todas las herramientas y bases teóricas disponibles que aporten medios tecnológicos o conocimiento previo, para obtener un producto robusto.

0.5.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un Accionamiento eléctrico para tracción lumbar y cervical con características de alta eficiencia energética y fácil operabilidad que permita al operario controlar la tracción sobre la columna en diversas formas y modos de operación.

0.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar la arquitectura del sistema haciendo uso de Solid Edge.
- Diseñar e implementar las tarjetas electrónicas haciendo uso de Eagles.
- Implementar el controlador PID embebido en un dispositivo digital.
- Proporcionar un sistema con Interconexión mediante protocolos de comunicación usados actualmente, para administración de datos mediante un PC.
- Establecer relaciones académicas con la facultad de Ciencias de la Salud para desarrollar el proyecto.
- Desarrollar una interfaz de usuario por medio de dispositivos mecánicos y electrónicos

0.6 PRINCIPALES APORTES

Los resultados obtenidos en este trabajo de grado contribuyen en el área de la Automática Industrial, específicamente a los siguientes campos: Maquinas eléctricas, Control de maquinas eléctricas, Dispositivos programables, Ingeniería del producto, Sistemas de control, y automatización de procesos. Entre los más importantes aportes se encuentran los siguientes:

- Realización de un equipo fisioterapéutico útil para prácticas de los estudiantes de fisioterapia.
- La implementación de un accionamiento eléctrico.
- Elaboración de la unidad de procesamiento de potencia.
- Elaboración de una interfaz de usuario Hardware.
- Elaboración de un PI digital.

- Control del par en el accionamiento eléctrico.
- Técnica para la construcción de partes usando el Solid Edge.
- Documentación y planos esquemáticos de construcción arquitectónica de la maquina.
- Documentación y planos esquemáticos de construcción electrónica de las tarjetas.
- Algoritmos y programa de control del accionamiento.
- Bases teóricas de diseño.

0.7 ESTRUCTURA DEL TRABAJO PRESENTADO

El proyecto consta de 3 fases discutidas en 6 capítulos; la primera fase consistió en la generación de la idea, la segunda fase trató sobre la evaluación y selección de los recursos para la implementación y la tercera fase convergió al diseño del prototipo. Las dos primeras fases se desarrollan someramente en el capítulo I y la tercera a lo largo del resto del documento.

El capítulo I se desarrolla la temática fundamental del proyecto. Se explica el origen de la idea del proyecto, la fisiología del cuerpo humano relacionada, los fundamentos de operación de la maquina con sus efectos, los modos de operación, las especificaciones, las técnicas de aplicación de tratamientos, el estudio del mercado y principios de electrónica para la solución, etc.

En el capítulo 2 se tratan aspectos importantes sobre la interfaz de la maquina. Como profundización a este capítulo, se explica en detalle cómo se establece la comunicación software de la maquina en el Anexo A, para que posteriormente se desarrolle el complemento del software de manejo sin mayor dificultad.

En el capítulo 3 se trata la parte de instrumentación del equipo. Como profundización a este capítulo, se incluyen algunas ofertas de mercado y características típicas de los instrumentos utilizados en el anexo B.

En el capítulo 4 se modela matemáticamente el motorreductor con base a las ecuaciones diferenciales expuestas en el anexo A, se diseña el convertidor modo suiche y se establecen las ecuaciones respectivas del modelo eléctrico de los bloques del accionamiento como tal.

En el capítulo 5 se elaboran los planos respectivos y se establece la estrategia de construcción, Además, se presenta una simulación general en 3D y se señalan algunos detalles de construcción de los componentes con información relevante para el proceso de fabricación. Como profundización a este capítulo, se consignan algunos planos de la maquina en el Anexo D.

En el capítulo 6 se consignan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el transcurso del desarrollo del proyecto.

En el anexo A se presenta toda la teoría relacionada y usada para el diseño que se expone en la monografía.

En el anexo B se expone la instrumentación utilizada con sus características y datos de fabricantes.

En el Anexo C, se consignan algunos aspectos eléctricos, de manejo y programación de los dispositivos periféricos del procesador como LCD, teclados matriciales, manejo de display dobles y otros aspectos.

En el Anexo D, se muestran los planos de las partes fabricadas.

En el Anexo E se expone la sección de motores DC del manual de Crouzet usada para la escogencia del motorreductor. Este manual fue enviado desde Europa y se adjunta en este trabajo con propósitos académicos. El manual completo contiene criterios para todo tipo de motores. Una copia de este manual puede ser encontrada en la biblioteca.

En el anexo F, CD documental de este trabajo se entregan todos los archivos relacionados con el diseño y la implementación del proyecto. En este se consigna lo siguiente:

- Programas de los dispositivos digitales.
- Diseños CAD de Placas circuitales.
- Programas de Simulación de Matlab.
- Diseños CAD de Simulación de Solidedge.
- Programa de supervisión

En el anexo G, se presenta el manual de operaciones del sistema.

1. FORMULACION Y DEFINICION DEL PRODUCTO

La fase más importante en el desarrollo de proyectos es la formulación y definición, pues en esta etapa se generan las ideas, se describen y analizan los fundamentos del desarrollo y se decide las características y objetivos que cumplirá el proyecto. Esta fase del proyecto resuelve el plan de trabajo y actividades que deberán ser desarrolladas para cumplir especificaciones.

Para llevar a cabo este estudio en el accionamiento eléctrico se comentan los orígenes del proyecto y se exponen someras bases de la fisiología del cuerpo humano relacionada, se consignan los fundamentos de operación de la maquina con sus efectos sobre el cuerpo humano, incluyendo formas de onda usualmente aplicados a la columna, especificaciones de las maquinas existentes, principios teóricos de electrónica para obtener la función principal y características finales del equipo fabricado.

1.1 GENERACION DE LA IDEA

La idea nace por la falta de recursos tecnológicos detectada por el área de fisioterapia de la Universidad del Cauca. Para comprender un poco más la generación de la idea se expone más detalladamente la necesidad. En el campo de la salud es indispensable contar con equipos efectivos y confiables para prestación de servicios médicos, sin embargo en el departamento del Cauca e inclusive en la nación, los recursos tecnológicos son limitados y los profesionales de la salud están distantes de conocer y manejar instrumentos modernos para la práctica de conocimientos. Es por eso que se inicio la formulación de proyectos entre las facultades competentes de la universidad del Cauca, orientados al desarrollo de equipos para prácticas precisas de los programas de la facultad de Ciencias de la Salud. Entre una gama de proyectos de biomédica se realizo el análisis de factibilidad y necesidad y se convino que la realización de una tracción LUMBOCERVICAL sería un buen proyecto de investigación por su innovación tecnológica de mejora y la visión de que una realización exitosa permitiría el adentramiento a los campos de investigación en patologías cervicales y lumbares en el área de fisioterapia, una vez desarrollado el accionamiento y además dejaría bases robustas en el área de control de procesos y maquinas eléctricas. Otro aspecto que complementó e impulsó la generación de la idea fue el de instituir buenas bases para la realización de otro tipo de proyectos cuyo desarrollo implicase análisis de las bases teóricas de accionamientos eléctricos y ciencias relacionadas con implementaciones practicas, así como la necesidad del instrumento para las practicas precisas y como medio tecnológico para incursionar en las investigación de tratamientos terapéuticos.

1.2 EVALUACIÓN Y SELECCIÓN

En esta sección se relacionan las bases teóricas con la aplicación desarrollada, tanto en el área de fisioterapia como en la de ingeniería, se concluye entonces a la solución implementada en base a los conceptos de las áreas relacionadas.

1.2.1 Fundamentos y Características de operación de la maquina.³ A continuación se expone diversos fundamentos que aportan y sustentan la operación del equipo y los requerimientos que finalmente fueron implementados en el diseño. Se tratará la teoría y las especificaciones del área de la salud en aras de demarcar claramente las funciones que se cumplen y se presentan las características asignadas al equipo para efectuar las tareas.

1.2.1.1 Fundamento teórico- científico de la tracción. La técnica de traccionar se usa como medida terapéutica de la escoliosis. Fue descrita por Hipócrates en el siglo V a.C. y Asclepiades y Galeno en el siglo II d.C. continuaron proponiéndola, en el siglo XI los cordobeses Avicena y Albucasis la recomendaron además para el manejo de fracturas y algías. Su influencia se extiende a hasta el renacimiento en numerosos tratados clínicos, es decir, en todas las épocas numerosos médicos se han interesado por ella. En nuestros tiempos se destaca James Cyriax, como el redescubridor y actualizador de la técnica a partir de 1950. En síntesis, es un procedimiento terapéutico conocido desde la antigüedad y aplicado a casi todas las afecciones osteoarticulares.⁴

La tracción terapéutica es la “aplicación de una fuerza a una parte del cuerpo para estirar los tejidos, separar las superficies articulares o fragmentos óseos”. También se define como “la fuerza que se aplica a un segmento corporal cuyo efecto es provocar un movimiento combinado de distracción y de deslizamiento que generalmente se aplica para disminuir dolor a nivel de la columna cervical y lumbar. Se trata entonces, de una fuerza aplicada perpendicularmente a las carillas articulares y paralela al eje de las palancas óseas o del segmento corporal traccionado donde los ligamentos toleran separaciones desde 1 a 3 mm. sin llegar a efectuarse su ruptura.

La tracción Lumbar y Cervical se emplea en Medicina específicamente por Ortopedia, como técnica de realineamiento y contención ósea tras traumatismos y cirugías. En Fisioterapia tiene su base clínica como terapia conservadora, con la finalidad de provocar la separación ósea con incremento de la interlínea articular (anillo fibroso y anillo pulposo, mostrados en la Figura 2.)

³ Conferencias de practicas Osteomusculares. Técnicas terapéuticas. F.T MARIA VERONICA TORRES ANDRADE. Docente Universidad Del Cauca.

⁴ MARTINEZ MURILLO, M y PASTO VEGA, JM. Manual de medicina física y rehabilitación. Editorial Harcourt Parocca. España S.A. 1.998.

La tracción se ha propuesto como la modalidad de tratamiento para los desordenes dolorosos, las deformidades y la pérdida del arco articular, especialmente de la columna vertebral. Es importante anotar que esta técnica se encuentra sometida a discusión, consecuencia de diversos factores, pues se considera que sus bases terapéuticas son empíricas, existencia de pocos estudios controlados, diversos métodos de aplicación que han contribuido a traer confusión y parámetros de aplicación no protocolizados.

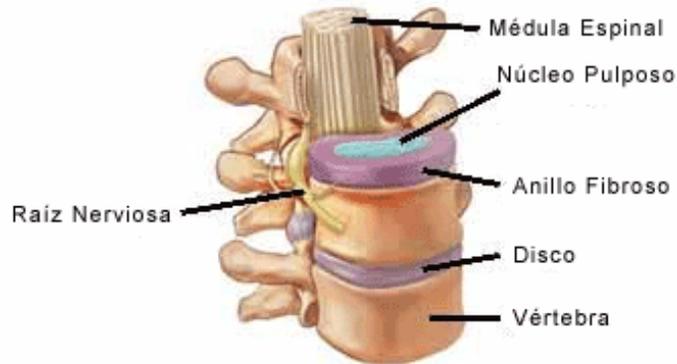


Figura 2: Segmento de la columna vertebral⁵

1.2.1.2 Tipos de tracción terapéutica. Las tracciones vertebrales pueden aplicarse empleando diversidad de materiales y medios, como, pesos a través de cables y poleas, máquinas electromecánicas programables. Además, se han empleado mesas y sillones de tracción sin descartar la posibilidad de tracción en piscina, por eso las tracciones articulares se dividen en:

- Activas o auto tracciones, en donde el paciente es el propio agente motor. Se realizan manualmente o mediante sistemas intermediarios mecanoterápicos, y Pasivas, en donde el agente motor es alguien o algo exterior al paciente. En base a ello el equipo implementado se considera como una tracción articular vertebral de tipo instrumental o de auto tracción con sistemas instrumentales.
- Según el objetivo articular, se diferencia entre tracciones vertebrales y de otras articulaciones.
- Según el tiempo de aplicación de la fuerza durante la sesión, las tracciones se clasifican en Fijas (máximas al inicio y progresivamente decrecientes), Continuas (constantes en la carga generalmente baja, y de larga aplicación, 20 a 40 minutos), Discontinuas o sostenidas (con pendiente establecimiento incremental, tiempo de mantenimiento de la carga y progresiva descarga,

⁵ MARTINEZ MURILLO, M y PASTO VEGA, JM. Manual de medicina física y rehabilitación. Editorial Harcourt Parocca. España S.A. 1.998.

con duración entre 20 y 60 minutos), y la forma Intermitente (con tiempos breves de carga incremental seguidos de periodos ligeramente superiores de descarga, generalmente no hasta 0 del peso, y con diversas combinaciones de aplicación) e Intermitente Pulsada (periodos de segundos de duración con altas cargas, seguidos de tiempo breves de descarga total.)

1.2.1.3 Técnica de aplicación. A continuación se consignan los procedimientos que deben ser realizados para ejecutar un tratamiento cervical o lumbar, como sigue:

- Fijar un arnés al paciente.

En tracción Cervical. En la actualidad se destacan tres medios de fijación, el arnés o collar de Sayre de apoyo cervicooccipital, el Cervicotractor de Maigne de apoyo Cervico - occipital y frontal y el arnés de Goodlney también cervicooccipital pero con una prolongación reforzada en dirección cervico distal y con el nacimiento de las correas de tracción bajo el raquis cervical.

En tracción lumbar. Tradicionalmente se ha empleado para la fijación un sistema de arnés de tipo corsé que comprime el tórax que provoca una sensación desagradable al paciente en el epigastrio y la región costal.

- Posicionar al paciente. Debe responder a los imperativos de comodidad, seguridad y eficacia de la técnica.

Tracción cervical. Con relación a la orientación del raquis cervical, Crue fue el primero en sugerir en 1957 que la posición idónea era con flexión de 20 grados de la columna cervical, basándose en que así se aumentan los agujeros de conjunción. En la actualidad, se sabe que ángulos de flexión de 20 y 25° permiten tolerar más altas cargas y atenuar la aparición de vértigo y nauseas. La gravedad y el peso del cuerpo del paciente en sistemas de plano inclinado, pueden emplearse sistemas de poleas sencillos, métodos instrumentales y los sistemas mecánicos motorizados.

Tracción Lumbar. Generalmente se propone que el paciente se ubique en decúbito supino, acompañado frecuentemente de flexión de caderas y rodillas con el fin de favorecer el aplanamiento del raquis lumbar.

- Dotar dispositivo de seguridad al paciente, este con un mando a manual controla la fuerza en caso de intolerancia o percepción de efectos secundarios.

- Establecer modo y parámetros de Aplicación. Se regula intensidad de la fuerza, duración, escalonamiento creciente, picos de alta intensidad, puntos de descarga progresiva escalonada y tiempo total de aplicación, etc.
- Retirar arnés y reiniciar sistema para un nuevo tratamiento.

1.2.1.4 Especificaciones requeridas. Del análisis de las necesidades planteadas para el sistema por parte del Departamento de Fisioterapia, se establecieron las siguientes especificaciones para el equipo:

- El sistema debe permitir pequeños rangos de operación en tracción y Fuerza ajustable, en el rango de 1.5 a 100 Kg.
- Componentes mecánicos externos: Polea externa, caja contenedora, sistema de transmisión de fuerza y mecanismo de acoplamiento con la camilla.
- Diferentes modos de operación (Ver Figura 3); por medio de un panel de control se manejan: Tiempo de aplicación, modalidad de tracción constante, intermitente, y sinusoidal.
- Mandos manuales para programar límites de fuerza de operación (superior-inferior), tiempo de operación, diferentes modos de operación (ver Figura 3), botón de encendido y botón de emergencia.
- Despliegues de las variables de operación: límite máximo, límite mínimo como la evolución de la variable medida.
- Señal acústica de fin del tratamiento: Con la suficiente intensidad para que no pase desapercibida.
- Interfaz de usuario de mandos y modos de operación.

1.2.1.5 Especificaciones Puntuales. Los tratamientos terapéuticos de tracción se dan a lugar en diferentes partes y posiciones del cuerpo, es por eso que para cada tipo de tratamiento o estrategia de aplicación de tratamiento, es necesario especificar ciertos parámetros que diferencian un tipo de tratamiento de otro.

- Tracción cervical: Los trabajos históricos confirman que se precisa una carga mínima de 4 a 5 Kg. para contrabalancear el peso de la cabeza, y una carga máxima de 12 Kg. lo que produce separación de 3mm en el espacio intervertebral posterior. Con la aplicación de esta gama de

intensidad de la fuerza, generalmente se produce el alivio de la sintomatología dolorosa, confirmada radiológicamente (Imagen osea) con un incremento del foramen (Cavidad) intervertebral en posiciones oblicuas. **Con más de 30 Kg. puede provocarse lesiones musculares y ligamentosas.** Por lo tanto se considera óptimo el margen de 10 a 13 Kg. Sobre la Intensidad y crono programación de la aplicación de la fuerza de tracción, la gama empleada va desde los 2 a los 45 minutos. En la práctica se recomienda comenzar con 5 a 10 Kg. en mujeres adultas y 7 a 13 Kg. en varones adultos.

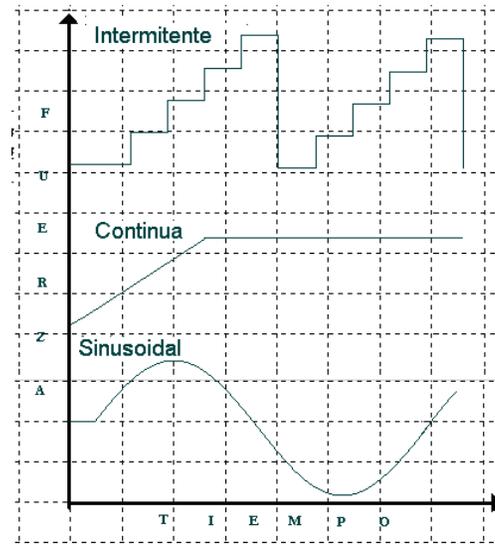


Figura 3: Modos de operación implementados

- **Tracción Lumbar.** Las cargas aplicadas a la columna lumbar actúan de la siguiente manera: con 5 a 10 Kg. se borra la lordosis, con 10 a 30 Kg. se genera espacio interlineal de 1.5 mm. y con 60 kg de 2 a 3mm, asociándose los fenómenos de regeneración y aspiración del disco (Figura 2). Sobre la intensidad y crono programación de la fuerza, existen autores que recomiendan alcanzar una carga entre los 22 y 45 Kg. otros, entre los 30 y 60 Kg. El tiempo de aplicación es muy variable, desde 10 minutos hasta varias horas dependiendo de la tolerancia del paciente.

1.2.2 Solución e implementación. Para cumplir con las características de operación anteriormente expuestas se analizaron varias estrategias de operación y características de productos existentes y con base a ello se seleccionaron metas de trabajo que fueron trabajadas con investigación hasta ser resueltas. A si mismo se exponen los detalles más importantes de la información recopilada de productos existentes similares al desarrollado, como además se consignan las características que hacen a este accionamiento eléctrico mas competente en relación a otros productos encontrados en el cauca y consultados por Internet.

1.2.2.1 Características de Productos existentes: De entre los productos existentes que fue posible analizar ya sea en forma indirecta (Vía Internet) o directa (en Popayán) son las siguientes.

Tracción Tx-1(Stationary Tracction Unit) de la empresa CHATTANOOGA CORPORATION: Sistema de tracción operando en el seguro social de Popayán con las siguientes características:

- Tratamientos posibles: intermitente progresivo, intermitente, estático y Progresivo estático.
- Rango de Tracción : 0-90 Kg.
- Despliegue de variables: Despliegue por 7 segmentos de la fuerza aplicada y del tiempo restante de tratamiento.
- Mando a través de relojes mecánicos: Libras de tracción, Tiempo de mantenimiento y tiempo de descanso.
- Pulsador para aumentar el tiempo total de tratamiento en minutos.
- Perilla manual para selección del tipo de tratamiento.
- Botón de inicio y Botón de encendido
- Led para modo operación: ilumina cuando hay fuerza aplicada
- Led para modo de descanso: ilumina cuando la maquina esta en modo de descanso.
- Dispositivo de seguridad.

Eltrac 439 (Made in Holland) de la empresa ENRAF NONIUS DELFT: Sistema de tracción fuera de operación en el hospital San José con las características enseguida mencionadas. Esta se muestra en la Figura 4.

- Tratamientos posibles: intermitente progresivo, y Progresivo estático
- Rango de Tracción : 0-100 Kg
- Despliegue de variables: Ninguna
- Mando a través de relojes mecánicos: Libras de tracción, Tiempo de mantenimiento y tiempo de descanso.
- Pulsador para aumentar el tiempo total de tratamiento en minutos.
- Perilla manual para selección del tipo de tratamiento.
- Botón de inicio y Botón de encendido
- Dispositivo de seguridad.



Figura 4: Tracción modelo Eltrac 439

Tracción MICRO T12 -MT12 de la empresa Medical Research & Development, SC con las características mencionadas a continuación. Esta se muestra en la Figura 5.



Figura 5: Tracción modelo MICRO T12 -MT12

- Tratamientos posibles: Continuo e intermitente
- Rango de Tracción: 0-99 Kg.
- Tiempo de reposo /Tensión:60 segundos
- Despliegue de variables: Tensión
- Limitación de Kg.: 0 -99 Kg. /0-20 Kg.
- Mando a través de perillas : Libras de tracción, Tiempo de mantenimiento y tiempo de descanso y tiempo total de tratamiento
- Perilla manual para selección del tipo de tratamiento.
- Botón de inicio y Botón de encendido
- Dispositivo de seguridad.
- Cable de red (110 V /5A)
- Manual de usuario

1.2.2.2 Características implementadas. Del análisis de mercado:

Características extraídas y adicionadas: Las siguientes son características propias de la maquina desarrollada; algunas de estas características son comunes para

todas maquinas existentes en el mercado, como los modos de operación y los dispositivos de emergencia. Sin embargo el equipo posee características propias de instrumentación, interfaces y aditamentos, adicionados para obtener ventajas con respecto a los productos anteriormente expuestos.

Extraídas del análisis de otros equipos:

- Tratamientos posibles: intermitente progresivo, y continuo (Progresivo estático)
- Rango de Tracción : 0-100 Kg
- Despliegue de variables a través de 7 segmentos: fuerza máxima, fuerza mínima, tiempo restante de tratamiento
- Botón de encendido.
- Transmisión de la fuerza al paciente por una lona o cuerda de 4.9 cm de ancho por 1.5 mm de espesor.

Adicionadas:

- Leds para indicar el tipo de tratamiento seleccionado.
- Despliegue de variables a través LCD: Fuerza aplicada, estado lógico de la maquina, realimentación de la configuración de la maquina.
- Operatividad de la maquina por medio de teclas y números.
- Operatividad de la maquina por medio de software.
- Realimentación de todos los datos hacia el computador: Tanto de parámetros del tratamiento como el estado de la variable aplicada durante todo el tratamiento donde se despliegan en etiquetas todos los datos insertados ya sea en forma manual o por ordenador.
- Señal acústica con notas musicales para el teclado.
- Sonido específico en la finalización de los tratamientos.
- Dispositivo de seguridad.

1.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO- BASES TEÓRICAS.

En esta sección se describen someramente los fundamentos generales utilizados y su influencia en los resultados finales de la construcción del prototipo. Adicionalmente se consigna el principio básico de funcionamiento de los accionamientos eléctricos.

1.3.1 Temática usada. La solución de la problemática de desarrollo de dicha herramienta fue afrontada a través de simulaciones y software de diseño. El trabajo esta conformado por simulaciones arquitectónicas en Solid Edge, simulaciones dinámicas de la planta en el entorno de Matlab, diseño de los circuitos impresos (boards) con el programa Eagles y programas de control escritos en MPLAB Assembler, así como toda la tematica que documenta todo el

proyecto. Como resultado final se consignan todos los resultados obtenidos y se presentan conclusiones importantes del proceso de construcción.

1.3.2 Fundamento teórico principal- Accionamientos eléctricos: En el accionamiento de la maquina, representado por los diagramas de bloques de la Figura 6, el motor es de corriente continua, el sensor es de fuerza, el controlador implementado en circuitos impresos manipula corriente, la carga es la columna vertebral del cuerpo humano, la PPU (Power Processing Unit o unidad de procesamiento de potencia. Power Preccesing Unit) procesa corriente directa a las escobillas del motor.

El accionamiento necesita de una fuente estándar de 110 VAC y de los respectivos comandos de entrada o puntos de referencia introducidos por medio de la interfaz, usados como referencia para aplicar la fuerza del motor DC sobre la columna hasta el punto deseado. Los bloques del accionamiento están diseñados para interactuar de modo que las condiciones o variables relacionadas con la carga correspondan o se igualen lo máximo posible al comando de entrada o punto de referencia señalado por un usuario, o un equipo de nivel superior que maneje el sistema. El controlador compara la variable de salida medida desplegada por una interfaz con el comando de entrada y según sea la diferencia entre ellas, provee una señal de control apropiada a la PPU. La PPU amplifica esta señal y la suministra al motor en una frecuencia y potencia adecuada.

En el accionamiento y su entorno se involucran señales distintas. En la Figura 6 se diferencian las señales de potencia (líneas gruesas) de las señales digitales (líneas delgadas). En la salida se muestra una doble línea que la diferencia de las variables eléctricas para indicar el par o variable de salida.

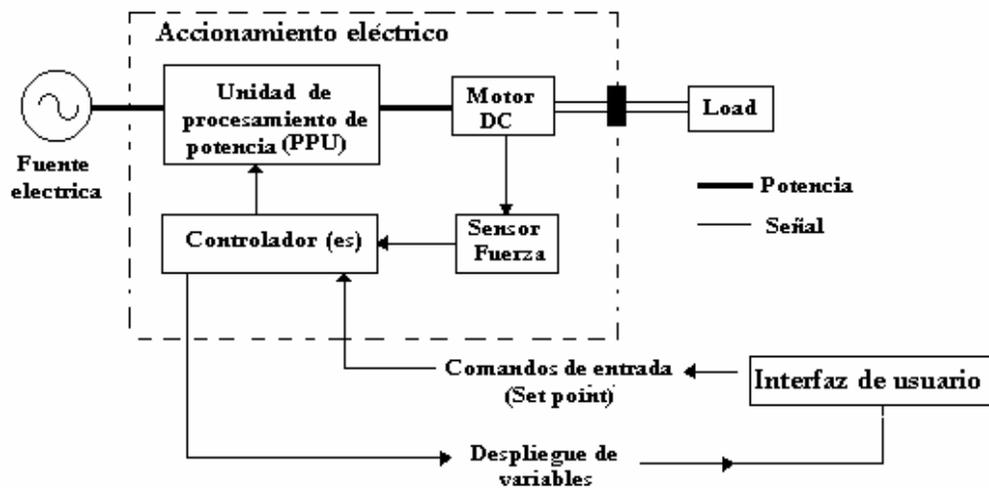


Figura 6: Accionamiento eléctrico - Diagramas de bloques

2. DISEÑO PARA INTERFAZ OPERACIÓN/ COMUNICACIÓN.

Para llegar a la obtención de un producto o servicio exitoso es necesario tener en cuenta varios aspectos de elección y diseño para su fabricación. Pues bien, para ello es necesario hacer énfasis en la generación de ideas y evaluación de las mismas. Para desarrollar la implementación del equipo fue necesario concebir el producto a desarrollar como un *producto mejorado*, y consultar vendedores vía Internet y profesionales en la región.

Este capítulo está dedicado a ilustrar las características que le dan el mayor valor agregado al equipo con respecto a los demás, sin embargo solo se comenta rápidamente describiendo la posibilidad de comunicación y comentando la estrategia implementada para la inserción de parámetros y acceso a los mismos desde y hacia las variables de operación de la máquina.

2.1 INTERFACES DE MAQUINA: La interfaz de máquina es usada para introducir, programar y vigilar el estado de la máquina. En el producto desarrollado la primera alternativa consiste en la inserción de parámetros por medio de la interfaz manual: los parámetros son insertados manualmente y su inserción es posible supervisarla a través de una pantalla de cristal líquido LCD y display de 7 segmentos.

La segunda alternativa consiste en la inserción de parámetros a través de software que corre en un computador personal (PC): los parámetros más importantes son desplegados en la *interfaz manual*, pero también esos y todos los parámetros de la máquina son mostrados en la *interfaz software*. La inserción de los parámetros se realiza a través de cajas de texto y los parámetros de operación son mostrados en etiquetas en una aplicación básica de visual Basic .

La característica fundamental que hace novedoso este sistema, es que permite obtener afluencia de datos cuando el sistema es conectado a un computador, posibilitando la visualización de todos los parámetros estáticos y dinámicos que se introdujeron y están ocurriendo.

Los programas de supervisión de la máquina se consigna en el Anexo F y el algoritmo del programa de control se expone en el Anexo C y de este documento.

2.2 ESTUDIO DE FLEXIBILIDAD Y OPERABILIDAD.

La tecnología digital aplicada a las interfaces permite mejorar el aspecto y visualizar mejor el estado de lo que se está manejando. Hoy en día la mayoría de electrodomésticos y artefactos electrónicos poseen instrumentos digitales que le

permiten al usuario programar dinámicamente actividades a su deseo. En nuestro tiempo este tipo de posibilidades refleja alta calidad en un producto y por tanto aumenta el valor agregado siendo un factor determinante a la hora de decidir entre un grupo de artículos de la misma clase. Sin embargo por el mismo hecho de ofrecer múltiples posibilidades esta se torna un poco compleja a la hora de programarse para una actividad específica.

Para el diseño de la interfaz de usuario hardware o de programación se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Para las etiquetas de la interfaz manual y las instrucciones en el despliegue LCD se usan nombres significativos que los identifiquen sin ambigüedad.
2. Se muestra instrucciones breves y fáciles de comprender, con explicaciones ampliadas en el manual de usuario.
3. Aspecto externo atractivo a la vista.
4. Uso razonable y consistente de los colores.
5. Despliegue de los parámetros más importantes.
6. Despliegue sencillo y adecuado del cursor en el LCD.
7. Permitir la corrección carácter a carácter y de campos de los parámetros de entrada.
8. Dar mensajes de error para los valores "ilegales".
9. Permitir retrocesos dinámicos.
10. Identificar la inserción exitosa de un carácter con un sonido.
11. Dar mensajes a nivel de operación para explicar su significado.
12. Presentar mensajes para una comunicación exitosa.

2.3 COMUNICACIÓN DE LA MAQUINA. PROTOCOLOS USADOS.

En esta sección se muestra la implementación lógica de la comunicación en el equipo. La comunicación en la maquina esta compuesta por 3 dispositivos inteligentes que se comunican a través de señales eléctricas y lógicas enmarcadas en las especificaciones del protocolo RS-232 expuestas en el Anexo A. Teniendo los recursos disponibles para comunicar la computadora por un puerto Asíncrono por defecto y los dos microcontroladores con una unidad USART, se eligió la configuración lógica y física de la red descrita en la Figura 7. En la figura se muestra la comunicación entre los dispositivos de la maquina (microcontroladores PIC18F452) así como con el PC. La comunicación se da a través del puerto serial por comunicaciones *no estándar*.

Los controladores se complementan para lograr el funcionamiento del equipo: el controlador 1 maneja un LCD paralelo, lee el teclado que manipula el usuario, procesa la señal de fuerza o par sensado, maneja 3 LEDS indicadores del tipo de tratamiento, se comunica con el computador y el controlador 2, calcula la señal y controla el par del motor. El controlador 2 recibe la información enviada por el

controlador 1 y la procesa para efectuar el despliegue, así como generar los sonidos pertinentes de los caracteres del teclado y ocurrencias importantes en el funcionamiento de la maquina. La comunicación a la computadora desde el micro de control (controlador 1) es full dúplex-asíncrona y entre el controlador 1 y el controlador 2 es simplex-asíncrona.

Se han implementado tramas específicas para la operación del equipo entre los dispositivos programables; estas tramas se transmiten y reciben en formas adecuadas para lograr un óptimo sincronismo. Su descripción se consigna en este documento, pero su explicación y ampliación se describe en detalle en el anexo A.

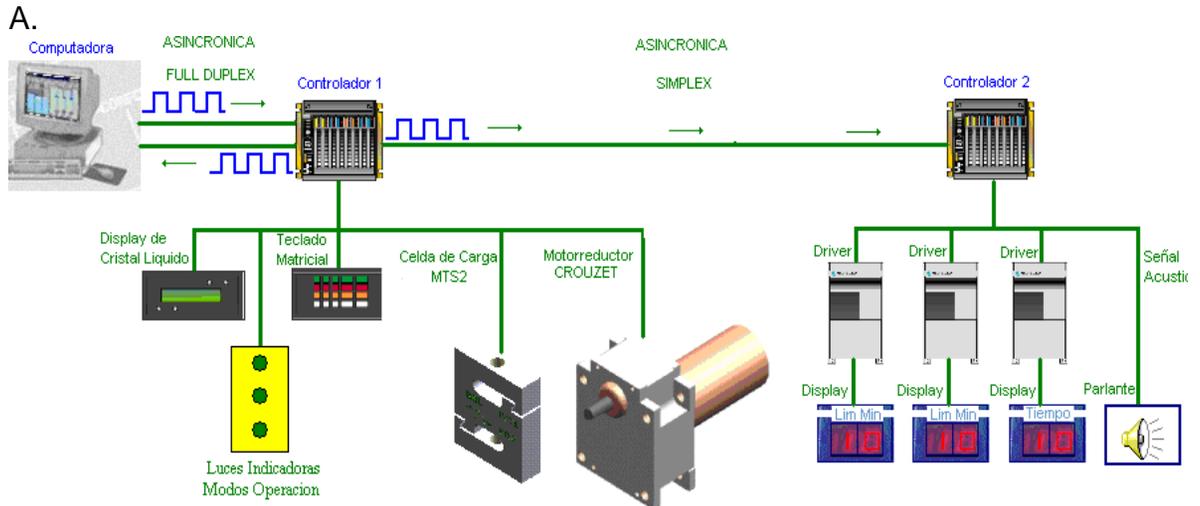


Figura 7: Diagrama de comunicación /operación del sistema de tracción.

Por las razones expuestas en el anexo A relacionadas con el sincronismo y efectividad en la comunicación se han implementado las tramas mostradas en la Figura 8 y Figura 9 . La Figura 8 representa la trama enviada por el computador al sistema y la Figura 9 la trama enviada por el sistema al computador.

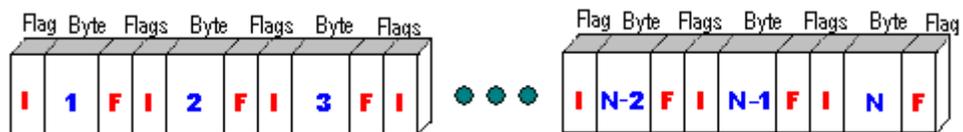


Figura 8: Trama implementada sobre el estándar de la Norma RS-232

Los campos en rojo representa la información de control agregada por el hardware de la norma RS 232 y la información en azul es la información incluida por el software que manipula la transmisión en cada uno de los componentes.

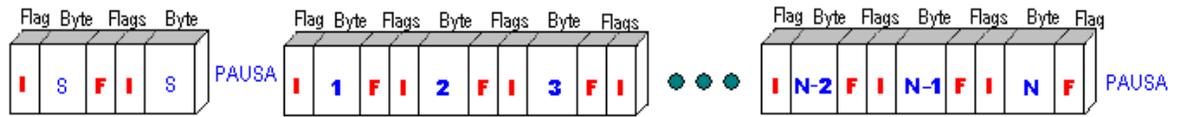


Figura 9: Trama implementada sobre el estándar de la Norma RS-232.

Donde:

I: Es el bit de inicio de cada byte enviado por la norma RS-232.

F: Es el bit de parada de cada byte enviado por la norma RS-232.

S: Es un byte de sincronismo.

N: Es el enésimo byte transmitido/recibido.

PAUSA: Es un espacio de tiempo de 10 mseg durante el cual no se transmite ni se recibe.

3. INSTRUMENTACIÓN.

El estudio de la instrumentación en un proyecto es uno de las partes más importantes, ya que determina aspectos como: factibilidad, costos, tiempo de desarrollo, técnicas de diseño y el desempeño de lo que se diseña como tal. Es por eso que se debe estudiar ampliamente todas las alternativas posibles, desde los principios de funcionamiento de la instrumentación a usar, hasta el valor agregado que ofrece cada instrumento, pues de esta manera se identifican las ventajas y desventajas que se obtendrán. Teniendo en cuenta esto, se definen todas las funciones que los instrumentos deben realizar, para posteriormente analizar varias soluciones.

La planta esta compuesta por: un instrumento para ejercer una fuerza entre 0-100Kg y un instrumento para medirla, una arquitectura mecánica de precisión, un sistema electrónico de manejo de potencia y despliegue digital, según las especificaciones consignadas en el capítulo 1.

3.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA TRACCION: Entre los campos posibles para elegir un instrumento que ejerza fuerza en el rango necesario ya descrito, está el eléctrico, el neumático y el hidráulico. Cada uno de estos campos ofrece las posibilidades mostradas a continuación:

3.1.1 Instrumentos - campo neumático/ hidráulico: Comercialmente se dispone de una gama de actuadores neumáticos e hidráulicos con accesorios, incluyendo posicionadores inteligentes, indicadores de posición, indicadores de control de posición y electroválvulas, que se pueden integrar fácilmente para crear paquetes completos de control de fluido. Inclusive los instrumentos pueden incluir protocolos de Red de Bus de Campo como parte del paquete válvula/ actuador. Sin embargo estos instrumentos industriales de calidad a menudo están diseñados para rangos de los de entre 10000 lbs/ pulgada-cuadrada hasta varios 100 miles de lbs./ pulgada-cuadrada, características no compatibles con las especificaciones de la tracción. A continuación se presentan especificaciones de algunos instrumentos hidráulicos / neumáticos producidos y distribuidos en Latino América por la empresa Morin:

Actuadores Neumáticos

- Presión de suministro hasta un máximo de 160 lbs./pulg. cuadrada
- Par de salida hasta 238,000 lbs./pulg. cuadrada
- Gama de temperaturas: -22°F hasta 212°F (-30°C hasta 100°C) con componentes estándar, opciones de hasta 300°F (149°C)

Actuadores Hidráulicos

- Presión de suministro hasta un máximo de 1500 lbs./pulg. cuadrada
- Fluido de suministro: cualquier fluido neumático o hidráulico compatible con los materiales de construcción
- Par de salida de hasta 115,200 libras/pulg. cuadrada
- Gama de temperaturas desde -22°F hasta 212°F (-30°C hasta 100°C)

Existen varias razones por las cuales se descarta el uso de este tipo de tecnología en la implantación de la tracción, tales como:

- Difícil consecución en el rango necesario. Es posible obtener el kit de instrumentos si se solicita bajo pedido.
- Se debe adquirir un kit de instrumentos para obtener el efecto deseado pero esto aumenta los costos.
- Los instrumentos aptos para la aplicación ya incluyen electrónica incluida y en consecuencia altera los costos. Desarrollar el acople electrónico aumenta los costos y desvía los objetivos del trabajo.
- Existen otras alternativas más viables para desarrollar la aplicación.

3.1.2 Instrumentos para el campo eléctrico. En este campo podemos encontrar una gran variedad instrumentos conocidos como motorreductores (motor+reductor) con varias alternativas, tales como son los motores: Paso a Paso, de Inducción, síncrono, universal y DC. Las dinamos AC generalmente son diseñados para trabajar en pares altos y a velocidades de trabajo del orden de los miles de rpm y su control de torque y velocidad no es nada sencillo, por eso se descartan desde el inicio.

Quedan por revisar los motores paso a paso y los de corriente continua. Un requerimiento importante de la aplicación, es que este debe ser un instrumento que trabaje en el campo continuo y los motores paso a paso trabajan en el campo discreto. Sin embargo existen motores con una gran cantidad de bobinas que permiten ejecutar movimientos cuasi-continuos, pero por el número de entradas hacen difícil su manejo y dificultan la implementación de control. Como se debe trabajar con desplazamientos del orden de los milímetros como se menciona en el capítulo 1, se elige un motorreductor de corriente continua por sus *características lineales* que serán expuestas en el capítulo 4 (Modelación matemática).

Históricamente los accionamientos con motor DC han sido los más populares en aplicaciones de control de velocidad y posición. Ellos deben su popularidad a su bajo costo y fácil controlabilidad. Su desaparición ha sido prematuramente pronosticada por muchos años, y de hecho han ido perdiendo una porción de mercado con los accionamientos que basan su funcionamiento en energía alterna

debido a que los accionamientos DC necesitan mantenimiento periódico del conmutador y las escobillas.

Debido a la tendencia del mercado al uso de los accionamientos AC, se pronostica que el motor DC será menos usado, ya que en un futuro los costos de los accionamientos AC serán más reducidos; su tendencia es mostrada en la Figura 10. Actualmente es más costosa las unidades de procesamiento de potencia para accionamientos AC debido a la complejidad electrónica de la PPU (Power processing unit) implicada. En este momento es posible implementar con menos dificultad el manejo de potencia para el funcionamiento de los motores DC.

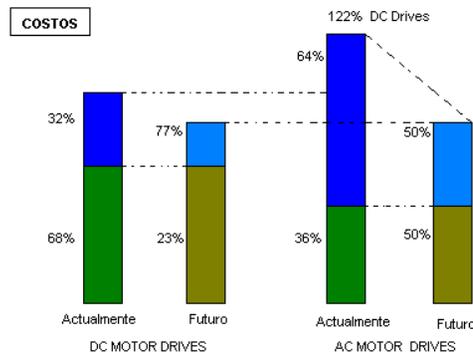


Figura 10: Comparación de costos de accionamientos AC Y DC.

3.1.3 Criterios de selección del reductor. Son varios los parámetros que se deben tomar en cuenta a la hora de elegir el conjunto reductor + motor que se debe incluir a un proyecto. A menudo los fabricantes presentan las características del reductor y del motor por separado, sin embargo también presentan algunas sugerencias y características de combinaciones de motor y reductor. Las funciones y requerimientos que debe cumplir el motorreductor dentro del proyecto son las que demandan específicamente qué reductor se debe utilizar. Para el caso de la tracción, en el capítulo 5 se calcula el torque específico máximo que debe alcanzar el motor en las peores condiciones, característica más importante para la elección del reductor en este caso. Este valor es poco un menor de 16 Nm, pero para elegir el reductor adecuado el parámetro del par máximo requerido del motor no es suficiente, sin embargo este hace parte de la **Potencia útil** deseada a la salida del reductor.

Debido al respaldo de fabricante, la experiencia y la atención al cliente dada por Crouzet se decidió la adquisición del motorreductor en esta empresa. Crouzet Automatismos .S.A puso a disposición un vendedor que realizaba llamadas telefónicas constantes y enviaba información vía e-mail y correo ordinario y en consecuencia se pudo obtener el manual de motores versión en español, anexo E de este documento. Adicionalmente se realizaron otras averiguaciones con otros fabricantes, estas se consignan en el anexo B en donde se exponen

motorreductores de diferentes fabricantes. *En adelante la elección del motorreductor se efectuará en base al manual Crouzet.*

La elección del reductor se realiza con base a la potencia útil de la siguiente manera:

En la Tabla 1 se muestra las características del motor elegido, en esta se consignan los parámetros de diseño que son los parámetros usados para la elección del motor y para efectuar los cálculos que serán expuestos en esta sección. La ampliación de esta información es posible obtenerla en el anexo E: manual de Crouzet versión en español.

Hay estrechas relaciones entre el análisis matemático de las curvas y características proporcionadas por el fabricante sobre el motor y el reductor en la elección acertada del motorreductor que se debe utilizar. A continuación se expone el análisis realizado para la escogencia del conjunto motor+ reductor en la aplicación.

1. El actuador eléctrico se escoge con base a la velocidad deseada. Dependiendo de los siguientes parámetros se opta por un motor o un motorreductor.

Velocidades de 1000 a 5000: Motor Directo

Velocidades inferiores a 500: Motorreductor

La naturaleza de la aplicación exige tiempos de establecimientos relativamente lentos en la rotación del eje, por esta razón el instrumento usado debe ser un motorreductor (Motor+ reductor). Además es difícil encontrar motores directos que alcancen pares elevados, caso de esta aplicación. El **motorreductor** elegido posee una velocidad nominal de 5.3 rpm en 24 V, sin embargo como se alimentara con voltajes inferiores a 12 V, la velocidad de operación máxima en el **motor** del motorreductor es de 1900 rpm (ver Figura 13-Velocidad en 12 V) y como la reducción es de 637 la velocidad máxima en el eje de salida del **reductor** esta dada por:

$$\text{Velocidad reductormax} = \text{Velocidad motormax} / \text{Indice de reduccion}$$

$$wL_{\text{max}} = w_m / \text{reduccion} = 1900 / 637 = 2.9 \text{ rpm}$$

2. Una vez ha definido la solución motor o motorreductor y su velocidad máxima, se deben analizar las características del motor proporcionadas por el fabricante (motor 82890- Tabla 1), tales como: Potencia útil máxima, Potencia absorbida y potencia util. Un buen diseño se desarrolla en base a

la potencia útil y absorbida y no en la potencia útil máxima, pues de esta manera se consigue una gran duración de vida.

Potencia útil: 90 W, Potencia absorbida 120 W en 24 V (Tabla 1).

En régimen estable y permanente la corriente que circula por el motor para la alimentación propia del sistema igual a 12 V es:

$$\text{Corriente absorbida} = \frac{\text{Potencial absorbida}}{\text{Veq(Alimentacion)}} = \frac{60W}{12V} = 5A$$

Significa que para la duración de vida considerada en la Tabla 1 (5000 horas), no deben circular corriente mayores o iguales a 5 A.

Tabla 1: Características del motor 80890 0

CARACTERISTICAS EN VACIO DEL MOTOR 80890 0		
Característica	Unidades	Magnitud
Corriente absorbida	A	0.45
Potencia absorbida	W	10.8
Velocidad de rotación	rpm	3700
CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL MOTOR 80890 0		
Característica	Símbolo	Magnitud
Inductancia del Motor	L_a	1.05 mH.
Resistencia del Motor	R_a	0.7 Ω
Inercia del Motor	J_m	105 g * cm ²
		105/10'000.000 Kg * m ²
Relación de radios	r_1/r_2	1/637
	r_2/r_1	637
K del Par	K_t	0.059Nm/A
K de Velocidad	K_e	0.059 $\frac{V}{rad/seg}$
CARACTERISTICAS NOMINALES DEL MOTOR 80890 0		
Velocidad de rotación	rpm	3200
Par	mNm	270
Potencia útil	W	90
Potencia absorbida	W	120
Vida	h	5000

3. Determinar el par proporcionado en la corriente máxima para el motor: Este se calcula basado en las curvas o el coeficiente del par proporcionado por el fabricante. Para 5A, el par proporcionado por el motor es:

$$\text{Par}(T_{em}) = K_e(\text{Pendiente de la recta}) * 5A$$

$$\text{Par}(T_{em}) = 0.059 * 5A = 0.295Nm$$

La Figura 11 muestra la característica par- corriente motor 80890 0. En esta figura se muestra el campo de trabajo del motor y representa el modelo lineal del comportamiento Corriente - Par de un motor DC. El parámetro de par encontrado representa una base del par de trabajo máximo recomendado para cualquier aplicación. En corrientes menores el par está dado por la curva de esta figura. El par máximo recomendado por encima del par nominal es del 100%, que corresponde a 0.54 Nm. No es el caso de esta aplicación, pues con el conjunto motor+ reductor elegido se trabajará por debajo de los valores nominales del motor. Esto se demostrará mas adelante.

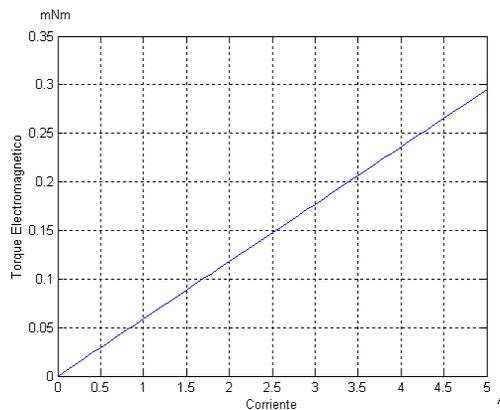


Figura 11: Curvas par-corriente del motor 82890 0 (24V-Nominal)

4. Determinar el valor propio del par en el motor para obtener el par máximo admisible en el reductor. Para ello se han extraído los parámetros del motorreductor 80898 011 del manual de crouzet y se han consignado en la Tabla 2. En base a estos parámetros se ha hallado el par específico para la aplicación de la tracción (Pintado en negro en la Figura 12), consistente en el par necesario en el motor para obtener 20 Nm en el eje de salida del reductor (denominado par en el punto de operación) con una razón de engranaje de 637 y una velocidad de rotación igual a cero, es decir:

$$\text{Par salida(reductor)} \approx \text{Par salida(Motor)} * R(\text{relacion del reductor})$$

$$\text{Par salida(reductor)} \approx 0.0314Nm * 637 = 20Nm$$

Adicionalmente la velocidad máxima en 12 V y el par nominal se referencian en rojo en la Figura 12.

Tabla 2: Parámetros del motorreductor 80898 011

CARACTERISTICAS DEL MOTORREDUCTOR 80898 011		
MOTOR :82 890 0- REDUCTOR 81 048 0- ALIMENTACIÓN 24V		
Característica	Unidades	Magnitud
Par máximo Admisible sobre el reductor en régimen permanente	Nm	20
Potencia Util	A	0.45
Potencia Util maxima	W	10.8
Velocidad de Salida	rpm	3700

20 Nm es el par de ruptura del reductor, un par por encima de este valor puede ocasionar destrucción en la primera exigencia.

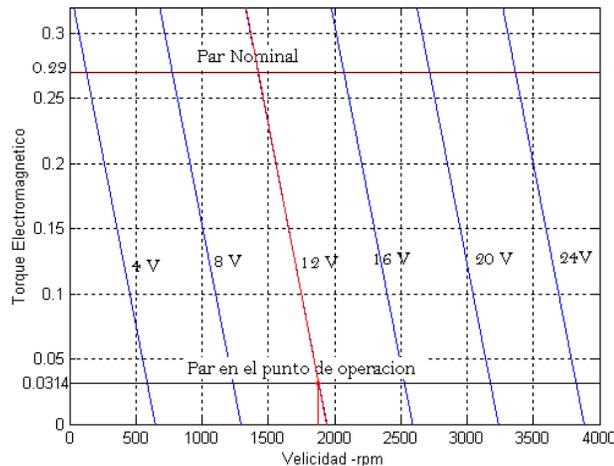


Figura 12: Curvas par velocidad del motor 82890 0 (Desde 0- 24V) y características fundamentales de la zona de trabajo.

Para complementar, de la Figura 12 se observa que el par de trabajo recomendado de este motor es posible conseguirlo con todos los niveles de alimentación pero con diferentes velocidades, que da como consecuencia diferentes tiempos de respuesta y potencia mecánica para diferentes aplicaciones. Es de notar que el conjunto motor+reductor ha sido diseñado para obtener el par máximo sobre el reductor con poco esfuerzo del motor debido a que el par necesario en el motor para obtener 20Nm en el Reductor esta muy por debajo del valor del par nominal, en consecuencia

las corrientes del motor para obtener el par máximo en el reductor son muy inferiores a la corriente nominal calculada en el punto 2 de esta sección.

5. El conjunto motor + reductor esta diseñado para demandar baja potencia eléctrica y obtener la potencia mecánica (par-velocidad), determinada por el usuario. Para nuestro caso la potencia mecánica deseada es determinada por el par en el punto de operación y la velocidad del reductor inducida por el voltaje de alimentación. Debido a la resistencia mecánica del reductor el usuario puede demandar cualquier potencia mecánica que exija máximo 20Nm. Como se mostrará en el capítulo 5, la aplicación exige al reductor máximo hasta cerca de 13 Nm.

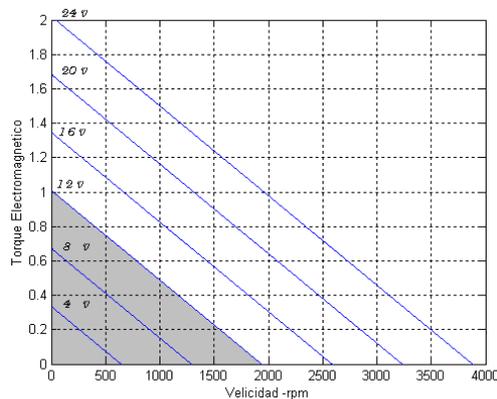


Figura 13: Curvas par velocidad del motor 82890 (0-24V-Nominal).

El área sombreada corresponde al área de trabajo del motor seleccionado. Estas velocidades están por debajo de la velocidad de salida definida con el nivel máximo de alimentación del motor. Estas curvas son obtenidas mediante ecuaciones expuestas en el capítulo 4 y el anexo A: Bases teóricas (modelación matemática-estado estable). La ecuación de origen de esta gráfica es la Ec. 1.

$$T_{em} = \left(\frac{-K_e * K_t}{R_a} \right) * \left(\frac{2 * \pi}{60} \right) * W_m + \left(\frac{K_e}{R_a} \right) * V_{eq}$$

Ec. 1: Ecuación de origen de las gráficas par velocidad y velocidad par de un motor DC de corriente estable.

Con la velocidad máxima y el par de salida exigido a esa velocidad, es posible determinar la potencia máxima exigida por el motor. El motorreductor ha de poseer una potencia útil superior o igual a la potencia útil deseada. Esta verificación puede realizarse fácilmente verificando el

punto de funcionamiento deseado (par y velocidad en la salida del motorreductor), el cual debe ser situado por debajo de la curva par-velocidad nominal del motorreductor. La potencia desarrollada es descrita por la siguiente formula:

$$P_{util}(W) = \frac{2 * \pi}{60} * C * n$$

Ec. 2: Criterio de potencia útil para la elección del reductor.

Donde: C : es el par deseado en Nm
 n : es la velocidad del reductor en rpm

Remplazando de los puntos anteriores se tiene para nuestra aplicación que la potencia util a 12 V es :

$$P_{util}(W) = \frac{2 * \pi}{60} * 2.98rpm * 20Nm = 6.24W$$

Que esta por debajo de la curva par -* velocidad del motorreductor como se muestra en la Figura 14. La curva mostrada corresponde a una alimentación de 24 V. los datos encontrados están paralelos y por debajo de la curva expuesta. La configuración resultante sugerida en el manual de Crouzet y estudiada en esta sección, está diseñada para lograr un par alto sin llevar al motor a condiciones exigentes. Se concluye que el par máximo esta limitado por la resistencia mecánica del reductor.

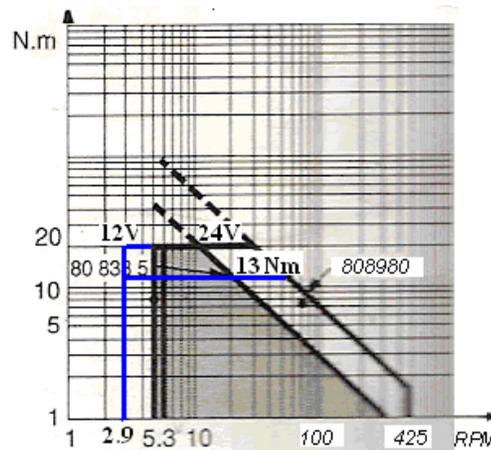


Figura 14: Curva Par velocidad nominal del motorreductor 82 898 011 ⁶

⁶ Manual de crouzet – versión en español
Ingeniería en Automática Industrial

3.2 ELECCION DEL SENSOR DE FUERZA. Para medir la fuerza de eje de salida del motor según las especificaciones del capítulo 1, se ha elegido una celda de carga. El principio básico de una celda de carga esta basado en el funcionamiento de cuatro galgas extensiométricos (strain gauge), dispuestas en una configuración especial. La galga extensiométrico es básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga. Las celdas de carga comerciales poseen generalmente unas características básicas, sin embargo existen algunas diferencias puntuales que inclinan al usuario a la hora de realizar una adquisición. La celda elegida es una celda de 100 Kg de rango medible, con protección contra sobre carga de hasta 150 %, su salida es 3.0001 mv /V diferencial. Lo que significa que esta entregara 3.0001 mv por cada voltio de alimentación aplicado. Especificaciones puntuales son discutidas en el anexo B de este documento, donde también se consigna información concerniente a los proveedores. La celda seleccionada es mostrada en la Figura 15 en conjunto con sus características.

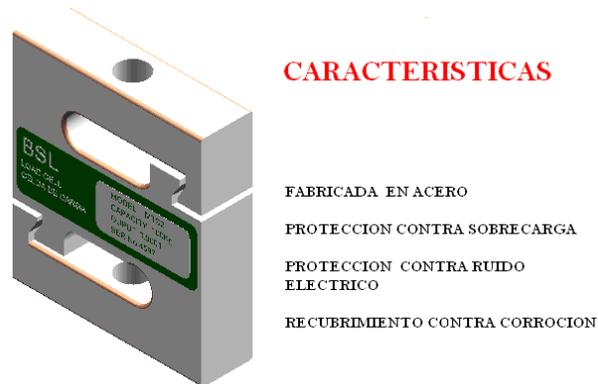


Figura 15: Celda de carga de 100 Kg marca BSL

3.3 ARQUITECTURA MECÁNICA DE PRECISIÓN: El proceso de diseño de toda la estructura y sus fundamentos se discuten en el capítulo 5 (Modelación arquitectónica en Solid Edge).

3.4 SISTEMA DE MANEJO DE POTENCIA Y DESPLIEGUE DIGITAL: El proceso de diseño electrónico del accionamiento y sus fundamentos se discuten en el capítulo 4 (Modelación matemática). Otros complementos del diseño electrónico son consignados en el Anexo C: Manejo y Programación de los dispositivos digitales.

3.5 LISTAS Y TABLAS DE INSTRUMENTOS: En este apartado se muestra la lista de elementos integrados al sistema, clasificados como *comerciales* (o

prefabricados) . En la Tabla 3 se consignan la lista de elementos comerciales, en la Tabla 4 los elementos mecanizados.

3.5.1 Piezas Comerciales. Son componentes que existen en el mercado. Comprende el actuador, el sensor y dispositivos electrónicos para implementación de las tarjetas del accionamiento.

Tabla 3: Piezas comerciales utilizadas en el accionamiento.

ELEMENTO	NUMERO DE ELEMENTOS	REFERENCIA
SENSOR DE FUERZA	1	(CELDA DE CARGA DE 100KG)
MOTORREDUCTOR DE REF 8898010	1	MOTOR 82 890 0 REDUCTOR 81 0480
DISPOSITIVOS ELECTRONICOS		
MICROCONTROLADOR	3	18F452 -MICROCHIP
TRANSFORMADOR	1	110/24 V –IMAX.4A
TRANSISTORES DARLINGTON	8	TIP122
OSCILADOR	2	CRISTAL DE 10MHZ
OPTOACLOPADORES	4	4N33
TECLADO MATRICIAL	1	4X4
DISPLAY	1	LCD DE 4X16
IC	1	LM 555
IC	3	ULM 2803
RESISTENCIAS	20	330 OHM ,1/4 W
RESISTENCIAS	20	220 OHM ,1/2 W
RESISTENCIAS	20	1K OHM ,1/4 W
RESISTENCIAS	10	2.2K OHM ,1/4 W
RESISTENCIAS	10	3,3 OHM ,1/4 W
IMPRESOS	2	20X18 CMS
IMPRESOS	1	10X18CMS
CAPACITANCIAS	20	10-1uF,10V 2-7200uF,30V 8-10uF,30V
IC	8	7447
DIODOS	10	LED
DIODOS	5	2 ^a
IC	1	MAX-232
SOPORTE DE BRIDA CON RODAMIENTOS EN X(CHUMACERAS)	2	DE 5/8 Y DE 1 PULGADA
BALINERAS	8	8002
LONA	5MTS	1 15/16 PULGADA
PARLANTE	1	5hms
TRANSFORMADOR DE AUDIO	1	450/5 Ohms
FUENTE SWITCHING	1	ATX OMEGA

3.5.2 Piezas mecanizadas. Son elementos o piezas elaboradas conforme a planos de diseño desarrollados con modelos CAD. La precisión depende de la resolución y tecnología de las herramientas cuando se usa el maquinado automático (CAM). En el caso de las piezas para este proyecto, se ha usado una herramienta CAD combinada con una cuidadosa estrategia manual, obteniéndose resultados bastante satisfactorios.

Tabla 4: Piezas mecanizadas incluidas en el accionamiento.

PIEZA	NUMERO DE PIEZAS
PLATINAS	6
TAPA	1
CAJA	1
CILINDROS RODAMIENTO	4
EJES	3
EJE ESPECIAL	1
EXTENSIÓN CILÍNDRICA	1
ESLABÓN EN U	1

4. MODELACIÓN DEL CONVERTIDOR MODO SUICHE

Este capítulo se enfocará a la determinación de un modelo que represente la dinámica del sistema, la estructura matemática del controlador y las ecuaciones respectivas de la electrónica del convertidor modo suiche.

El accionamiento implementado es representado como se muestra en la Figura 16. Está compuesto por una unidad de procesamiento de potencia (PPU) cuyo principio se fundamenta en los convertidores modo suiche que operan a altas frecuencias. La máquina DC incluida es un motor de imán permanente.

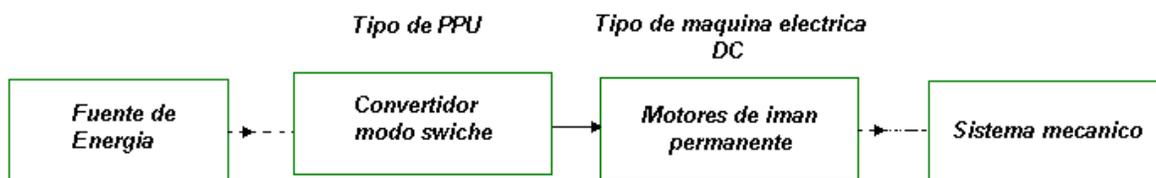


Figura 16: Combinación PPU –Maquina DC

Para comenzar la modelación, se encuentra el modelo matemático de la planta mediante un desarrollo matemático, cuyos principios son el resultado del análisis de los comportamientos electromagnéticos y mecánicos de los de los motorreductores DC cuyo estudio es consignado en el Anexo A de este documento. Luego se procede a hacer una simulación dinámica en el entorno de Matlab. La simulación de la planta expresa la dinámica real y es base para diseñar y probar el controlador y entender a perfección todo el funcionamiento.

Los datos para la simulación son tomados de las especificaciones del fabricante extraídas del manual de Crouzet, Anexo E de este documento. Estos parámetros se consignan la Tabla 5.

4.1 DINAMICA DEL CIRCUITO DEL MOTOR.

Remplazando los parámetros de la Tabla 5 en la **Ec. 3**, se obtiene la *ecuación del circuito del motor* como sigue:

$$V_{eq} = ia * Ra + L * \frac{d(ia)}{dt} + Va \text{ o } V_{eq}$$

Ec. 3: Malla de voltajes en el circuito equivalente motor.

$$V_{eq} = 0.7 * i_a + 1.05 / 1000 * \frac{d(i_a)}{dt} + 0.059 * \omega_m$$

Donde:

V_{eq} = Voltaje de armadura en Voltios.

i_a = Corriente de armadura en Amperios.

R = Resistencia interna del motor en Ohms.

K_e = Constante de voltaje del motor.

L = Inductancia interna del motor.

ω_m = Velocidad angular del motor.

$V_a = K_e * \omega_m(t)$ en Voltios.

V_a = Voltaje contraelectromotriz – Efecto generador.

Tabla 5: Características electromecánicas del motor 82890 0

CARACTERÍSTICAS DEL MOTORREDUCTOR 80890 0		
Característica	Símbolo	Magnitud
Inductancia del Motor	L_a	1.05 mH.
Resistencia del Motor	R_a	0.7 Ω
Inercia del Motor	J_m	105 g * cm^2
		105/10'000.000 Kg * m^2
Relación de radios	r_1 / r_2	1/637
	r_2 / r_1	637
K del Par	K_t	0.059 Nm/A
K de Velocidad	K_e	0.059 $\frac{V}{rad/seg}$

4.2 DINAMICA DE LA MECANICA DEL SISTEMA

Remplazando los parámetros de la Tabla 5 en la **Ec. 4** y despreciando inercia de la carga, se obtiene la ecuación de balance de torque del sistema:

$$T_{em} - T_L * \frac{r_1}{r_2} = d \frac{(WL)}{dt} \left(J_m * \frac{r_2}{r_1} + J_L * \frac{r_1}{r_2} \right)$$

Ec. 4: Balance de torque total-Ecuación diferencial torque electromagnético y velocidad de carga

$$T_{em} - 1/637 * TL = d \frac{(WL)}{dt} (105 * 637 / 10000000) \quad \text{ó}$$

$$T_{em} - 0,00157 * TL = d \frac{(WL)}{dt} (0,0066885)$$

Donde:

T_{em} = Torque electromagnético en Nm.

TL = Torque de carga en Nm.

$d(WL) / dt$ = Aceleración de la carga en rad / s^2 .

J_m = Inercia de la carga en $Kg * m^2$.

J_L = Inercia del motor en $Kg * m^2$.

4.3 DINAMICA DE LA CARGA- DEL CUERPO HUMANO.

La dinámica de la carga es incierta, pues no existen bases teóricas que permitan modelarla, ni es fácil adoptar un método experimental para encontrarla, sin embargo se ha asumido esta dinámica similar a la que presenta un resorte, pues esto tiene su base clínica si nos remitimos a las bases teóricas expuestas en las consideraciones del cuerpo humano dadas en el capítulo 1. Así, se supone que algunos tejidos se elongan hasta 3 mm con una fuerza aproximada de 65 Kg. De otra parte por experimentación se encontró que la cuerda o lona que conecta al reductor también se elonga un promedio de 5 cm en 75 Kg, entonces la constante se supone lineal y puede ser encontrada de la Ec. 5.

$$F = -K * x$$

Ec. 5: Fuerza en un resorte

Remplazando lo anteriormente descrito se tiene:

$$K = \frac{-F}{x} = \frac{75 \text{ Kg} * 10m / s^2}{5 * 10^{-2} m} = 15000 \text{ Kg} / s^2$$

4.4 ANALISIS DE LA DINAMICA DEL SISTEMA.

Sustituidas las dinámicas encontradas mediante las ecuaciones anteriores del sistema con el reductor 82 890 011 marca Crouzet, se obtiene la modelación dinámica del mismo. Su diagrama de bloques se presenta en la Figura 17. En este diagrama se observa el componente dinámico del circuito del motor, el modelo dinámico-mecánico del sistema y la dinámica de la carga implícitos en los subsistemas. Cada subsistema está titulado con la dinámica que le corresponde, estos son: Modelo dinámico eléctrico del motor que simula la **Ec. 3**, dinámica de la mecánica del sistema que simula la **Ec. 4** y dinámica de la carga cuyos parámetros representan en cierta forma a la **Ec. 5**. Adicionalmente se muestra la una fuente moduladora de ancho de pulso y la salida del sistema nombrada como TL (Torque de carga)

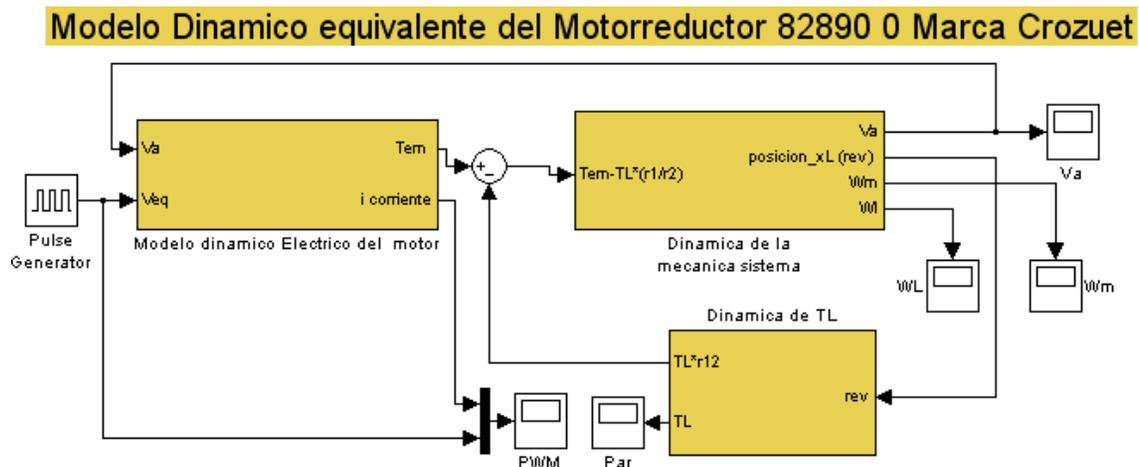


Figura 17: Modelo dinámico en diagrama de bloques del motorreductor 82 890 0

La dinámica se describe de la siguiente forma: La fuente PWM es la excitación de todo sistema; esta posee el ciclo útil (duty cycle) que debe ser el adecuado para manipular la magnitud de la corriente en la armadura del motor. Una vez se tiene corriente en la armadura del motor, se genera un par electromagnético **Tem** que hace que la carga conectada a la salida del reductor inicie a girar y, al existir velocidad en el sistema, se induce un voltaje contraelectromotriz **Va** que se opone a la circulación de la corriente. Como la dinámica de la carga actúa como un resorte y este se supone elongado por el sistema, entonces su dinámica depende del desplazamiento radial del eje que lo elonga, en consecuencia la magnitud de fuerza de oposición del resorte es directamente proporcional al cambio angular del eje de salida y el par de posición aumenta en relación a esta fuerza de oposición. Cuando el par de oposición se equilibra con el par electromagnético visto a la salida del reductor, la velocidad del sistema tiende a cero. Entre más velocidad de giro en el eje de salida, el sistema alcanzará el punto deseado en tiempos más

reducidos. Por ello a la hora de colocar el ciclo útil, se debe tener en cuenta, cual es el tiempo de establecimiento deseado para que la fuerza en la carga alcance el valor deseado. Esta velocidad se define por las curvas par-velocidad para una alimentación dada.

Con la explicación general del funcionamiento del sistema, se procede a detallar cada subsistema para ilustrar mejor la interacción de de cada una de las variables involucradas.

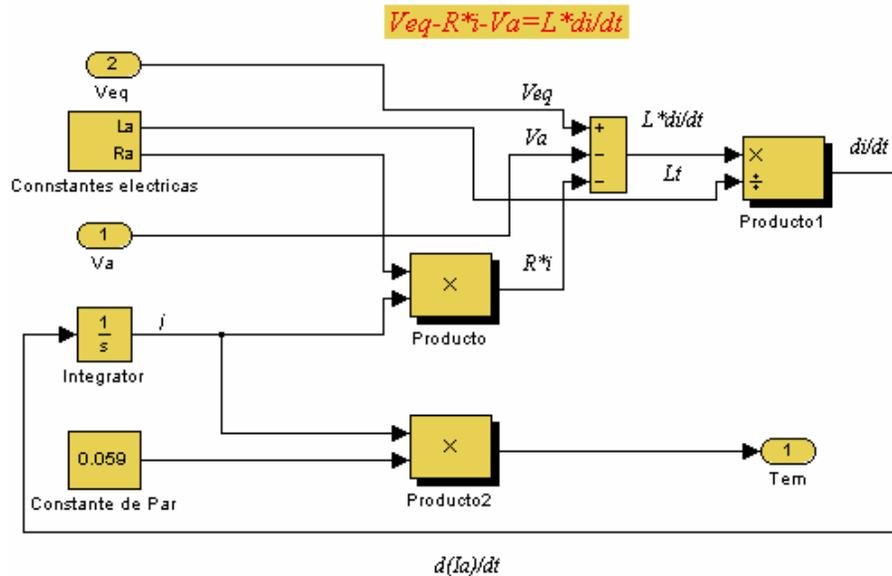


Figura 18: Dinámica del circuito del motor

La Figura 18 representa el modelo dinámico del circuito eléctrico del motor en donde se muestran sus componentes. La entradas a este circuito son: una fuente de excitación **Veq -promedio** de ciclo útil manipulable y la fuerza contraelectromotriz **Va** proveniente del subsistema mecánico. La corriente depende de estas entradas y en términos lineales puede ser descrita mediante la siguiente ecuación en el dominio de la place:

$$ia(s) = \frac{1 / Ra}{(L_a / R_a) * S + 1} (V_{eq}(s) - Va(s)) = \frac{1.43}{1.5 / 1000 * S + 1} (V_{eq}(s) - Va(s))$$

Ec. 6: Corriente de estado Transitorio del motor

Esta ecuación puede ser usada para determinar las formas de onda de corriente de armadura, sin embargo para ello se debe determinar o suponer la dinámica de la velocidad del sistema. Como la frecuencia de **Veq** (Señal PWM) es mucho

mayor que la frecuencia de V_a (Proporcional a la velocidad), la dinámica de la corriente es gobernada por la frecuencia de V_{eq} y por la constante de tiempo mostrada en la **Ec. 6**, 1.5/100. Es decir, el periodo PWM debe ser mucho más corto que la constante de tiempo ya mostrada, para obtener un grado de control de la magnitud de la corriente. Esto se discute propiamente más adelante.

A continuación se analiza la dinámica en el subsistema titulado dinámica de la mecánica del sistema descrita por el diagrama de bloques de la Figura 19.

Una importante relación tiene el modelo de la carga en la respuesta de este subsistema, pues la diferencia torsional entre el par a la salida del reductor y el par ejercido por la carga en la salida del reductor determinan la velocidad y a su vez afectan el circuito eléctrico del motor como ya se describió. Las entradas a este subsistema son el torque electromagnético amplificado por índice de reducción (del motorreductor) y el torque de carga, así la *Ec. 4* puede reescribirse como sigue:

$$637 * T_{em} - T_L = 4.2 * d \frac{(WL)}{dt}$$

Ec. 7: Balance de torque total-Ecuación diferencial torque electromagnético y velocidad de carga.

Y la velocidad lineal en el dominio de Laplace puede escribirse en términos de las diferencias torsionales lineales como sigue:

$$WL(S) = \frac{151.7 * T_{em}(s) - 0.24 * T_L(s)}{S}$$

Ec. 8: Balance de torque - Ecuación de la place de la velocidad de carga

De la **Ec. 8** se observa que la velocidad del motor es la integral de las diferencias torsionales, por tanto esta crecerá en función del resultado positivo de las diferencias y disminuirá en función del resultado negativo de las diferencias torsionales.

Las constantes del este sistema son mostradas en la Figura 20. Como las variables velocidad y posición determinan el voltaje contraelectromotriz y el torque de carga respectivamente, estos son hallados y dispuestos como salida a los demás subsistemas que los relacionan.

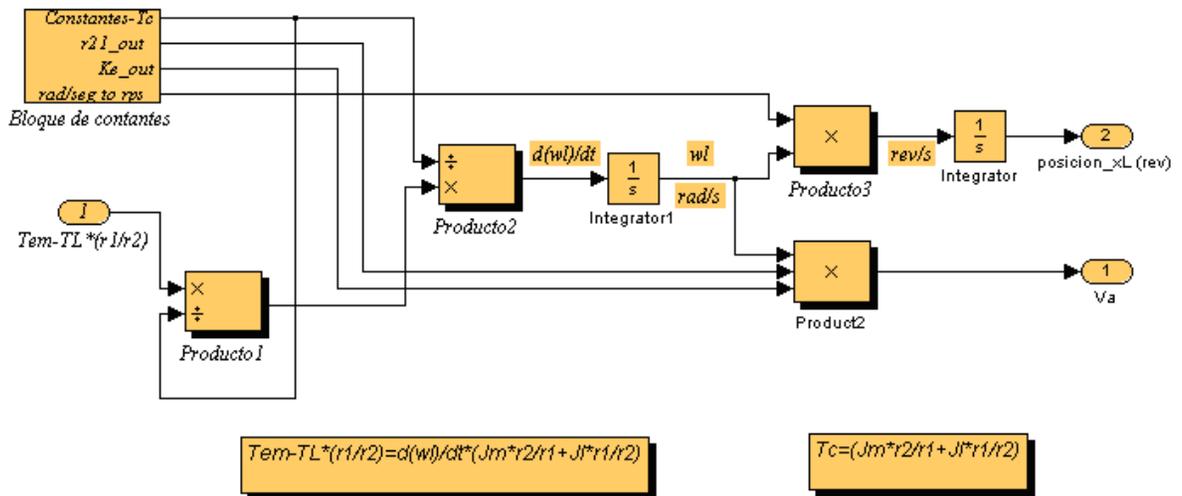


Figura 19: Diagrama de bloques correspondiente a balance de momentos.

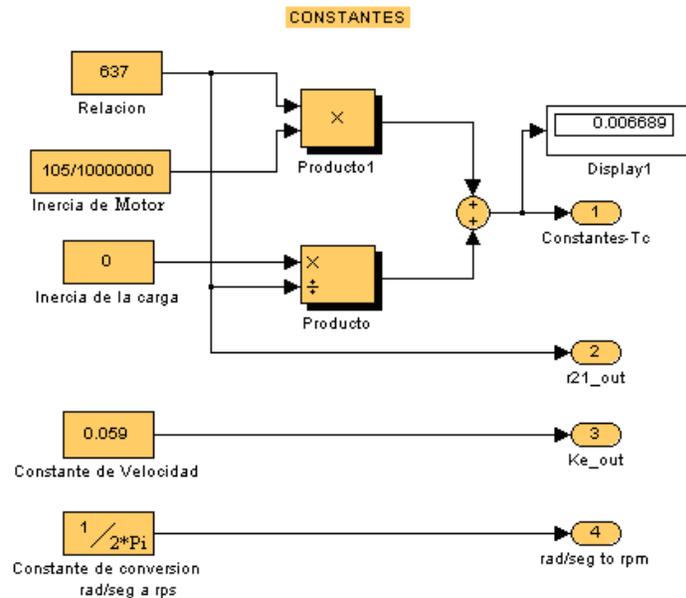


Figura 20: Constantes del sistema dinámico -balance de momentos

El subsistema de la carga descrito en la Figura 21, es el que expresa el par de salida en base a la constante del resorte equivalente de la carga, el diámetro y el desplazamiento radial del eje de salida. La entrada de este subsistema son las revoluciones del motorreductor que deben ser transformadas al desplazamiento lineal, teniendo en cuenta que el diámetro del eje de salida o extensión cilíndrica (ver Figura 67) es 1.5 cm.

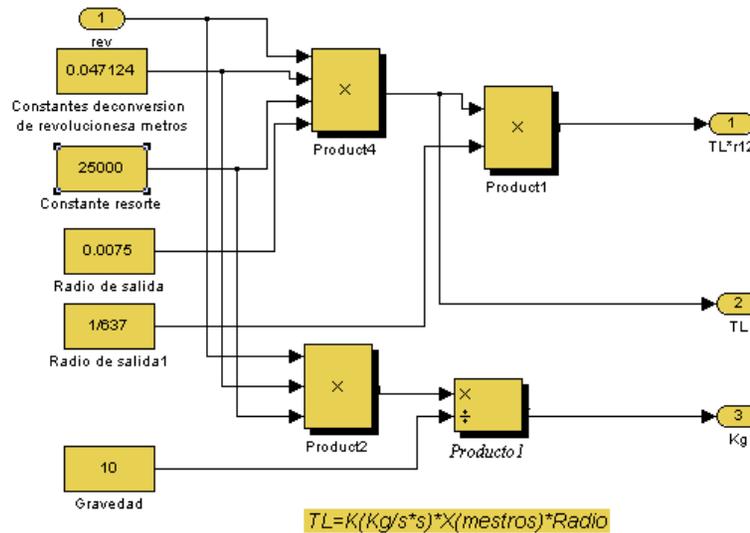


Figura 21: Dinámica de la carga

Las demás constantes son determinadas en base a lo descrito en la Ec. 5. La salida de subsistema es el torque de carga **TL** y es entrada al sistema dinámico correspondiente al balance de momentos tal y como se describe en las ecuaciones mostradas.

En la Figura 22 y Figura 23 se presentan las características de lazo abierto de velocidad y fuerza contraelectromotriz inducida para un setpoint del 45 % de ciclo útil (simulación en Matlab). En ella se observa que la velocidad **W_m** y **V_a** disminuyen a medida que aumenta el torque de carga que es mostrado en la Figura 24. Sin embargo para esta respuesta no tiene en cuenta el par de ruptura de la caja reductora que es de 20 Nm. Como se mostró en el capítulo 2 con las curvas par-velocidad, es posible alcanzar el par máximo en la mayor parte de curvas en los distintos niveles de alimentación. Es por eso que el controlador debe inducir la corriente de armadura para superar el par de carga y una vez superada y alcanzado el punto deseado suspender la alimentación, pues el reductor del motor impide que el motor gire hacia atrás cuando no hay alimentación al mismo. Entonces el controlador implementado debe incluir condiciones de reset de la acción de control para mantener el par, que en consecuencia lo convierten en un controlador con características no lineales de funcionamiento.

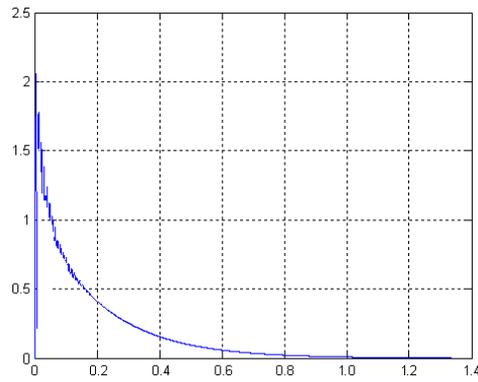


Figura 22: Fuerza contraelectromotriz (Va-Voltios) para un ciclo útil del 45%.

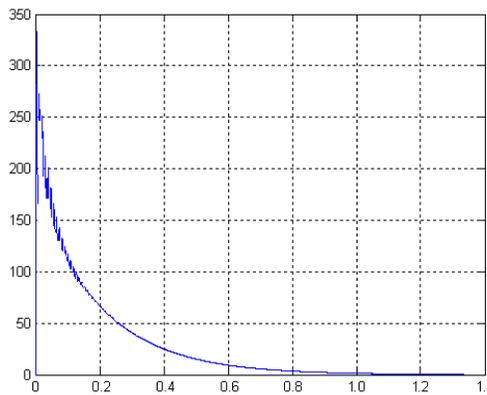


Figura 23: Velocidad del sistema (Wm) para un ciclo útil del 45%

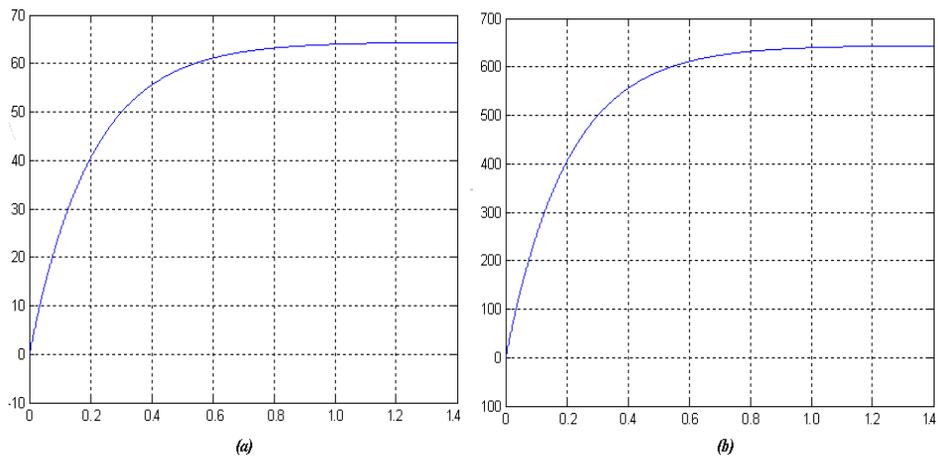


Figura 24: Respuesta del sistema para 45 % y 95% de ciclo útil.

Otras formas de ondas se muestran en la sección del convertidor modo suiche.

4.5 DISEÑO MATEMATICO- ELECTRONICO DEL CONVERTIDOR MODO SUICHE.

En esta sección se busca diseñar las tarjetas electrónicas, cuya función principal será suministrar formas de onda adecuadas en voltajes y corrientes al motorreductor DC a partir de la fuente de energía estándar. Otros segmentos del diseño electrónico se tratarán en las respectivas secciones del controlador, la planta y el sensor. Para los accionamientos eléctricos, el módulo que desarrolla la conversión de energía de la red principal en energía apropiada para algún tipo de motor se denomina PPU (Unidad de procesamiento de potencia). La PPU diseñada usa los principios de conversión modo suiche para lograr alta eficiencia energética, bajo coste, tamaño y peso mínimos.

4.5.1 Principio de funcionamiento. La Figura 25 muestra el principio usado comúnmente en las PPU. Esta estructura contiene rectificadores, seguido de etapas de filtrado para convertir la línea principal AC en DC.

La combinación rectificador-filtro o convertidor AC-DC, forma una señal DC adecuada para ser suministrada al los devanados del motor. Una ampliación en diagramas de bloques del convertidor AC-DC se muestra en la Figura 26.

La unidad de procesamiento posee dos polos, identificados como A y B como en la Figura 25. El controlador conecta la armadura del motor a cada polo, estos conmutan la polaridad del voltaje aplicado en forma opuesta, obteniendo una dirección de corriente conforme a esa polaridad. La polaridad cambia el sentido de giro del motor que permite aumentar o disminuir la fuerza ejercida en la carga por el desplazamiento radial. Las características de diseño y funcionamiento de los polos son iguales y estos operan excluyentemente uno del otro.

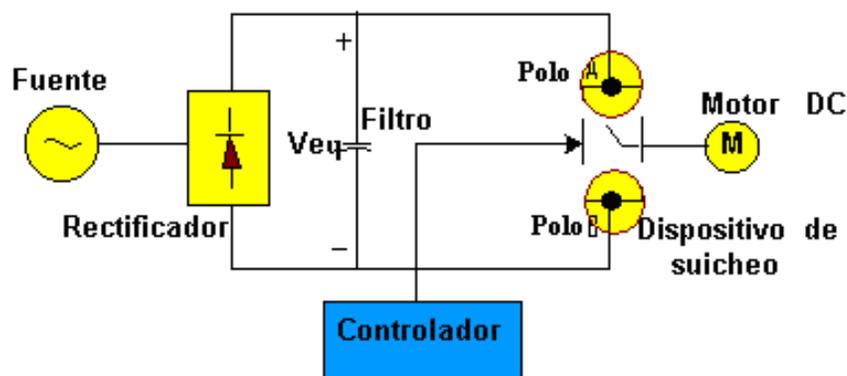


Figura 25: Principio básico de la PPU.



Figura 26: Convertidor AC -DC.

4.5.2 Convertidor AC-DC. Usado para convertir la tensión alterna en una tensión continua y cuasi-estable para el motor, usando los siguientes componentes:

- ✓ Transformador de entrada;
- ✓ Rectificador a diodos
- ✓ Filtro para el rizado

Una descripción somera pero suficiente del diseño de cada uno de los subbloques de la fuente se realiza a continuación:

Transformador de entrada: El transformador de entrada reduce la tensión de red de 110 VAC a una tensión de 12 VDC. El esquema de transformador simplificado despreciando pérdidas, puede considerarse como en la Figura 27. En este se muestran sus dos arroyamientos aislados primario y secundario conectados magnéticamente.

La tensión de salida depende de la tensión de entrada y del número de espiras de primario y secundario. Acerca de la relación de los voltajes en sus bobinados con la fórmula general se dice que el voltaje de salida V_2 depende del Voltaje de entrada V_1 con la siguiente relación:

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$$

Ec. 9: Relación de voltajes en un transformador

Donde N_1 y N_2 son el número de espiras del primario y el del secundario respectivamente. El transformador de referencia MAGOM M-509 incluido al proyecto, tiene una relación de $N_2 / N_1 = 9.2$. Así, como el voltaje en el primario son 110VAC el voltaje en el secundario es:

$$V_2 = 110VAC * \left(\frac{1}{9.2} \right)$$

$$V_2 = 12VAC$$

Por el primario y el secundario pasan corrientes distintas, la relación de corrientes también depende de la relación de espiras pero a la relación inversa, de la siguiente forma:

$$I_2 = I_1 * \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

Ec. 10: Relación de corrientes en un transformador

Donde I1 e I2 son las corrientes de primario y secundario respectivamente

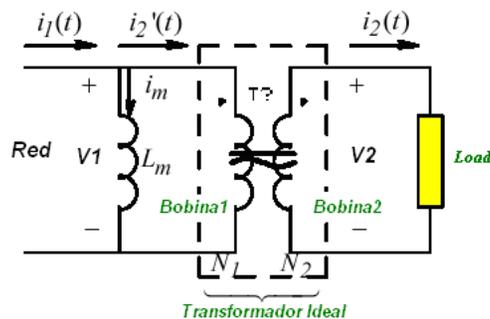


Figura 27: Esquema simplificado del transformador.

Por tanto para una corriente máxima promedio en el secundario de 5 A en el primario circula una corriente también máxima de 543 mA.

Rectificador a diodos: El rectificador se encarga de convertir la tensión alterna que sale del transformador en tensión continua mediante un rectificador en puente. Su esquema es mostrado en la Figura 28-b. Es posible encontrar rectificadores comerciales desde 1A hasta 100 A para rectificadores industriales. Para nuestro caso la corriente máxima por el puente es de 5A, en rotor bloqueado.

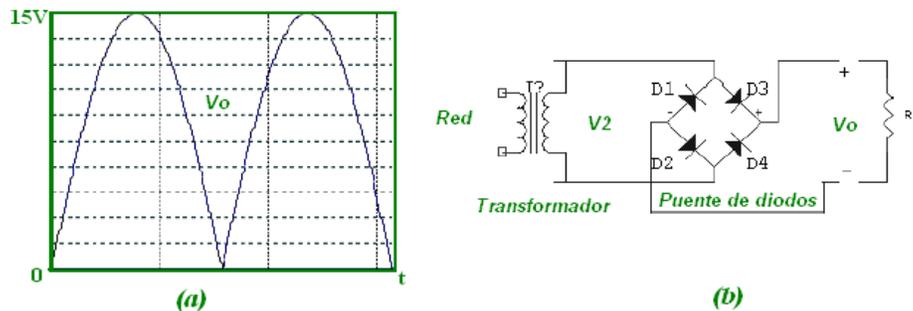


Figura 28: Señal rectificada y circuito rectificador

Referencias posibles para puentes rectificadores comerciales pueden ser ECG 5312, ECG 5313 y ECG 5329.

Para el diseño se debe a tomar en cuenta la caída de tensión en los diodos cuando estos conducen. La magnitud de este voltaje varía dependiendo de la corriente de entre 0.7 hasta 1 V. Así por ejemplo, en el puente de diodos conducen 2 a la vez, por tanto la caída de tensión es aproximadamente 2 V. Por ello el voltaje de salida del rectificador es calculado por la siguiente expresión:

$$V_o = (V_{rms} * \sqrt{2} - 2) \text{ Voltios .}$$

Ec. 11: Voltaje de salida del rectificador

Donde V_{rms} es el valor comercial de los transformadores. El voltaje de salida DC en el accionamiento es por tanto:

$$V_o = (12V * \sqrt{2} - 2) \text{ Voltios}$$

$$V_o = 15V$$

El filtro: La tensión en la carga que se obtiene de un rectificador es en forma de pulsos. En un ciclo de salida completo, la tensión en la carga aumenta de cero a un valor de pico, para caer después de nuevo a cero. Esta no es la clase de tensión continua que precisa los motores DC. Lo que se necesita es una tensión constante. Para obtener este tipo de tensión rectificada en el motor es necesario emplear un filtro. El tipo más común de filtro es el del condensador a la entrada de la carga, con este elemento se obtiene la forma de onda que se muestra en la Figura 29-a, entonces el esquemático general del convertidor AC-DC es tal y como se muestra en la Figura 29 –b.

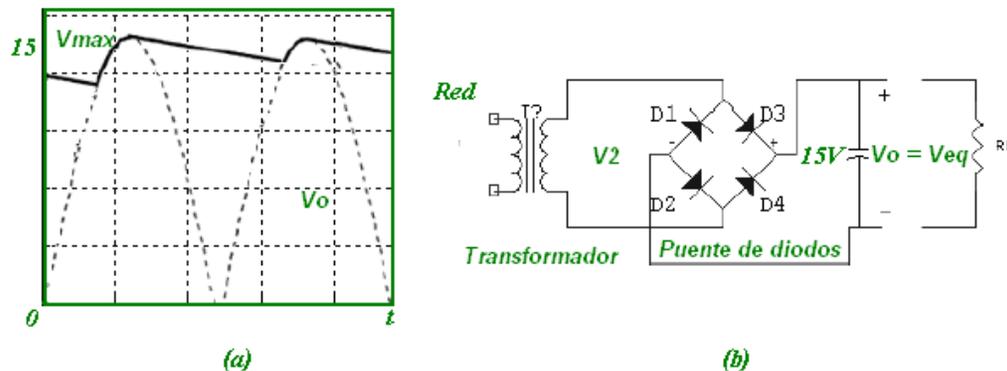


Figura 29: Acción del filtro y filtro en convertidor AC-DC

La regla de diseño del valor del condensador para un rizado del 10% de V_o (regla del 10%) es:

$$C = \frac{(5 * I)}{f * V_{\max}}$$

Ec. 12: Regla para diseño del filtro

Donde: C: Capacidad del condensador del filtro en faradios; I: Corriente que suministrará la fuente; f: frecuencia de la red; V_{\max} : tensión de pico de salida del puente (aproximadamente V_o).

C entonces tiene exactamente un valor de:

$$C = \frac{(5 * 2)}{60 * 15} = 11111 \mu f$$

4.5.3 Voltajes suministrados por la PPU: Una vez se tiene el voltaje V_{eq} (ver Figura 29 –b.) con buenas características DC, este es usado como una entrada de voltaje para el convertidor modo suiche. La tarea específica del convertidor es entregar una magnitud de voltaje ajustable DC, amplificando la señal de control con cierta ganancia y conversión. La señal proviene de un algoritmo de control y es generada por el microcontrolador. El programa de control esta situado en el CD del proyecto, anexo de este documento. Los dispositivos semiconductores, amplifican la señal de control y operan como suiches (Todo o nada). La Figura 30 muestra las formas de onda que se producen en la armadura del motor por la señal de control.

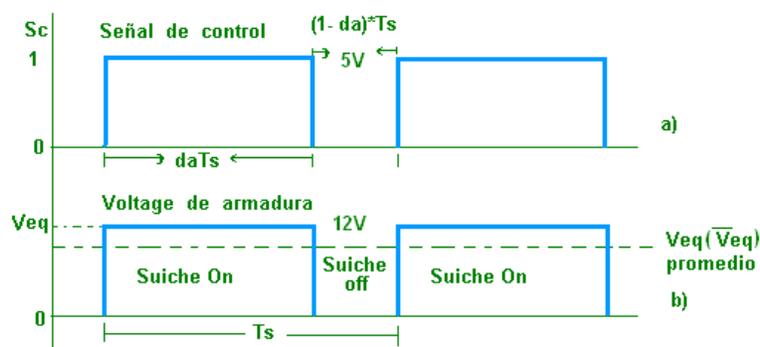


Figura 30: Formas de onda de voltaje en la armadura del motor

Donde T_s = Periodo de la señal (**frecuencia = $1/T_s$**); el valor de esta frecuencia para motores DC varía típicamente desde unos pocos Khz hasta 50 Khz. Las

formas de onda son originadas por el PIC18F452 en el dispositivo de suicheo. Note que cuando la señal **Sc** o señal de control esta en **5V**, el voltaje de armadura esta en **Ve_q** igual a 12V.

El motor DC funciona con el voltaje promedio de la Figura 30 de magnitud \bar{V}_{eq} igual a:

$$\bar{V}_{eq} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_{eq} * dTs$$

$$\bar{V}_{eq} = \frac{1}{T_s} \left[\int_0^{da*Ts} V_{eq} * dTs + \int_0^{(1-da)*Ts} 0 * dTs \right] = V_{eq} * da$$

Ec. 13: Voltaje promedio visto por el motor en una señal proveniente del convertidor modo suiche

Note que el voltaje aplicado al motor es un factor de **da** (ciclo útil). De este modo \bar{V}_{eq} cumple con:

$$V_{eq}(da = 0) \leq V_{eq} \text{ promedio} < V_{eq}(da = 1), \text{ que conlleva a } 0 \leq \bar{V}_{eq} < 12.$$

4.5.4 Corriente suministradas por la PPU: Debido a la inductancia en serie, la forma teórica de la onda de corriente es aproximadamente igual a la de la Figura 31-a. Esto se confirma con los resultados obtenidos de la simulación de los diagramas de bloques de la Figura 17, con las formas de onda de corriente expuesta en la Figura 31-b. Note que la corriente asciende o desciende en cada flanco de la señal de suicheo pintada en verde (líneas verticales). En la Figura 31-a se muestra el valor promedio I_A (Corriente promedio) en líneas punteadas y la forma de onda de la corriente variable en el tiempo. El valor pico-pico de la onda debe ser mínimo para evitar perdidas de potencia en los bobinados del motor, o sea $(L * di/dt)$ mínimo.

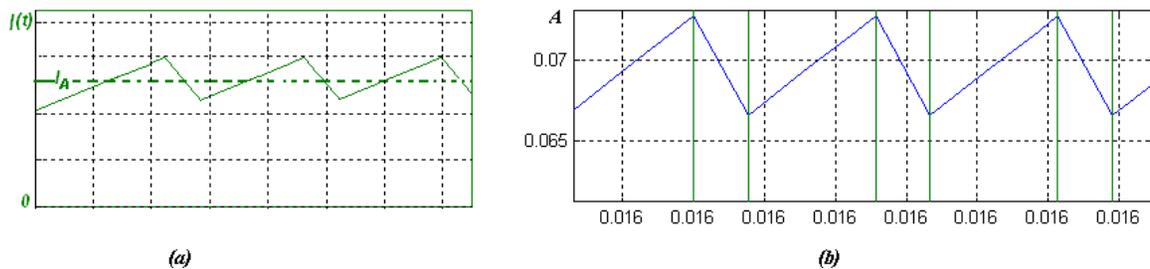


Figura 31: Formas de onda de corriente en el motor.

Los valores promedio y de rizado de la Figura 31 son encontrados con base al circuito equivalente de la Figura 32 usando el principio de superposición. Separando las variables se tiene:

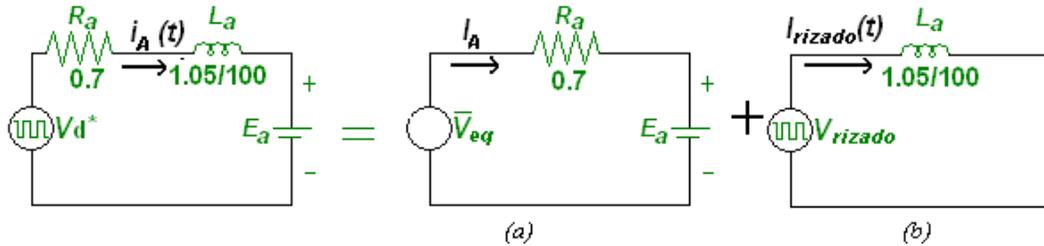


Figura 32: Componentes promedio y de rizado equivalente del motor DC.

Así, las expresiones totales que los representan son respectivamente:

$$V_{eq}(t) = \bar{V}_{eq} + V_{rizado} \qquad i_A(t) = I_A + i_{rizado}(t)$$

Ec. 14: Ecuaciones de voltajes y corrientes de estado promedio y de rizado de un motor DC alimentado por un convertidor modo suiche

De la malla aplicada al circuito estacionario de Figura 32–a de valores promedios se tiene:

$$I_A = \frac{\bar{V}_{eq} - E_a}{R_a} = \frac{\bar{V}_{eq} - K_e * W_m}{0.7}$$

La Ec.15 muestra la corriente que circula en el motor en condiciones del arranque, con ella se muestra claramente que esta depende del voltaje promedio inducido por el controlador en su armadura. Entre mas pequeña sean las corrientes circulantes se extiende la vida útil del motor. Así que el control se debe ocupar de que el motor arranque con el voltaje mínimo necesario para inducir la corriente mínima de arranque.

$$I_A = \frac{\bar{V}_{eq}}{0.7} \qquad \text{Ec.15: Corriente promedio en velocidad cero}$$

Esta corriente teóricamente es de 9.6 A, en el voltaje nominal del motor que es 24 V, como se muestra en las especificaciones, sin embargo esta se puede reducir controlando el voltaje aplicado. Experimentalmente se ha obtenido que la corriente de arranque mínima es de 1 A, por tanto \bar{V}_{eq} debe ser de 0.7 V.

De la malla aplicada al circuito transitorio o de rizado (Valor promedio eliminado) de la Figura 32–b se tiene:

$$V_{\text{rizado}} = V_d * -\bar{V}_{eq} = L_a * \frac{di}{dt} = 1.05/1000 * \frac{di}{dt}$$

$$12V - \bar{V}_{eq} = 1.05/1000 * \frac{di}{dt}$$

Ec. 16: Voltaje de rizado en un motor alimentado por un convertidor modo suiche

Note que **Ec. 16** se formula con base a la forma de onda de la Figura 33 donde los valores promedio son restados y la caída de voltaje en la bobina equivalente es función del voltaje promedio y este a su vez del ciclo útil.

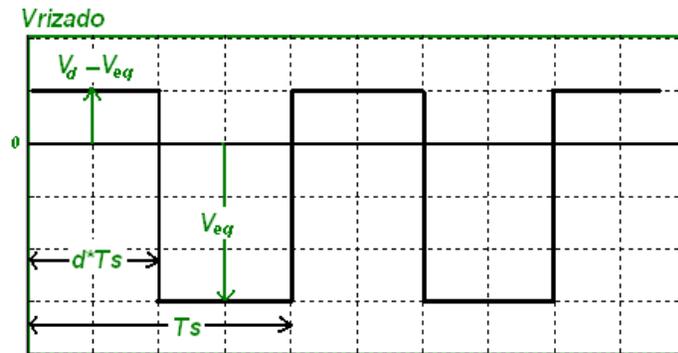


Figura 33: Voltaje de rizado en el motor DC. (Valores promedios anulados)

Así, la variación de corriente puede ser expresada como sigue:

$$di = \frac{(V_d - V_{eq})}{L_a} * d_A * T_s$$

Ec. 17: Variación de corriente en un motor DC alimentado por un convertidor modo suiche

La magnitud de la variación de la corriente debe ser mínima para evitar pulsaciones de torque y pérdidas de potencia en los devanados, por ello la frecuencia de suicheo debe ser de entre 2 Khz. para motores grandes y hasta 40 Khz. para motores pequeños. Esta variación de corriente es mucho mayor cuanto mayor sea el ciclo útil y el tiempo de ciclo.

La condición anterior implica que a voltajes promedio cercanos a cero la variación de corriente en relación a la **Ec. 17** es apreciable, implicando que para estas condiciones ocurren las mayores pérdidas. En contraste, en el límite máximo donde hay mayor eficiencia ($V_{eq} = V_d$), la variación de corriente es cercana a cero. Lo cual establece que a mayor voltaje producido por el controlador en la armadura, la corriente inducida es más eficiente debido a la baja variación de corriente que ocasiona menos pérdidas en los devanados de motor.

4.5.5 Implementación del convertidor modo suiche. El convertidor modo suiche esta compuesto por una unidad hardware de precisión PWM embebida en el PIC18F452 y un circuito amplificador y conmutador de la dirección de la corriente.

Tabla 6: Frecuencias disponibles del MIPIC 18F452 en un cristal de 40Mhz.

Frec. PWM (Khz)	2.44	9.77	39.06	156.25	312.50	416.67
T-PWM Util	0,287 ms	0,0714 ms	17.92 us	4.48 us	2.24 us	1.68 us
$L \cdot di/dt$ (Voltios)	3.5	3.58	3.597	3.599	3.602	3.606
Prescaler	16	4	1	1	1	1
PR2	0XFF	0XFF	0XFF	0X3F	0X1F	0X17
Resolución Máxima	14	12	10	8	7	6.58

La unidad PWM produce las formas de onda de la Figura 30. Esta unidad produce una señal con una frecuencia de suiche que debe elegirse de manera adecuada. Para ello hemos usado la dinámica representada en la Figura 17 en el entorno de matlab, pero sin la dinámica de la carga, el rotor en vacío y a partir de ello excitamos el sistema con un ciclo útil del 70%, con las frecuencias de Tabla 6.

En la Figura 34 se muestra que la forma de onda de corriente es similar en sus parámetros de forma, máximos y mínimos con respecto a la frecuencia. Sin embargo si se inspecciona en detalle se revela que las variaciones de la corriente en el motorreductor son variables con el periodo de la señal.

De la gama de frecuencias disponibles de la unidad PWM para el manejo del reductor, mostradas en la Tabla 6, la frecuencia de 2.44 Khz. (columna 2, pintada en amarillo) es la mas adecuada. La frecuencia PWM es una función matemática dependiente de los valores asignados en los registros de funciones especiales (SFR) del PIC18F452 consignados en la columna 1 de esta tabla.

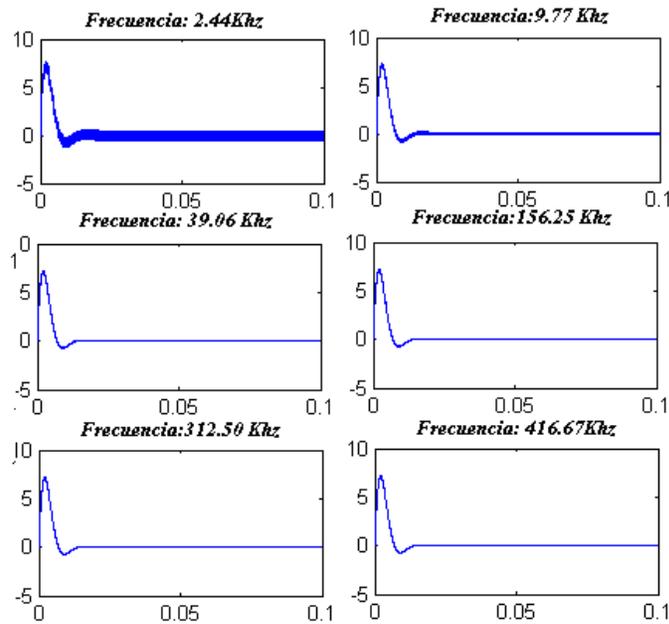


Figura 34: Efecto de la frecuencia de suicheo.

La Figura 35 detalla la variación de corriente en la armadura del motor de las ondas de la Figura 34 para diferentes frecuencias de excitación.

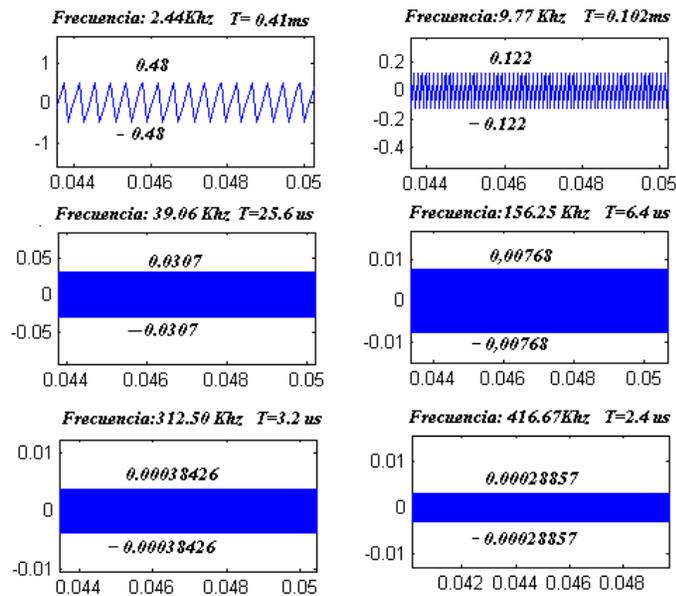


Figura 35: Variación de la corriente de armadura en función del ciclo útil.

La variación de la corriente representa las pérdidas de potencia con respecto a la frecuencia de suicheo. En cada sub-gráfica de esta figura se muestra los valores picos de esta corriente. A partir de estos valores y del tiempo de ciclo útil consignados en la Tabla 6, se calcula la caída de voltaje $L \cdot di/dt$ en los bobinados. También se muestra que para una frecuencia de 2.44 Khz la tensión $L \cdot di/dt$ es menor que para las otras frecuencias PWM.. El parámetro dt es el 70% del periodo, pues el sistema fue excitado con un ciclo útil del 70%.

El circuito amplificador. La Figura 36 muestra las unidades generadoras de PWM, cuyo objeto es lograr la variación de la corriente de armadura mediante la modulación del ancho de pulso de los voltajes aplicados. Este circuito suministra voltajes y corrientes en polaridades y direcciones positivas y negativas en la armadura del motor, además de suministrar protección contra corrientes de reversa que son evacuadas hacia la fuente en el caso de frenado regenerativo (Cambio de dirección del par) o suspensión instantánea de voltajes aplicados .

Los transistores de potencia darlington operan como un grupo de suiches. Para suministrar la polaridad apropiada deben ser accionados en pares como lo muestra la Figura 37. Cuando un estado inactivo es deseado, los transistores operan como los suiches (S1, S2, S3 y S4) de la Figura 37-a.

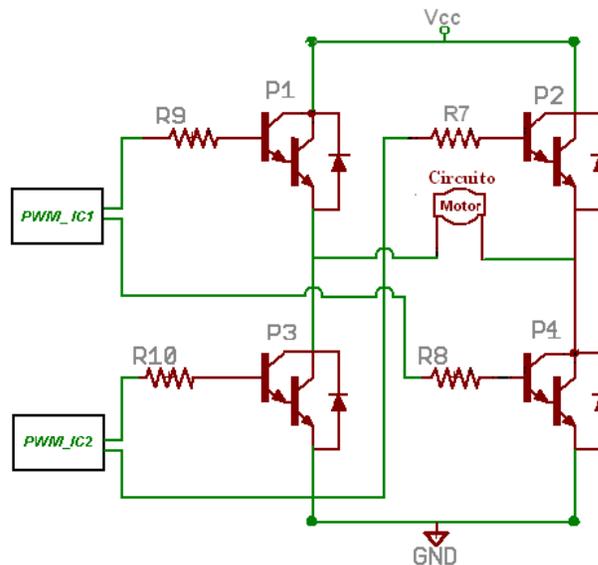


Figura 36: Convertidor modo suiche para un motor DC

Si se desea suministrar voltaje y corriente a la armadura del motor los suiches deben ser activados como lo muestra la Figura 37-b para una dirección y Figura 37-c en dirección opuesta. Como se observa los suiches son implementados con transistores de “superbeta (producto de ganancias)” o darlington cuya ganancia

es del orden de mil. El diseño del puente es realizado bajo la condición de una alimentación de armadura igual a 12 V. Adicionalmente para que los transistores de potencia operen como interruptores, es necesario que estos trabajen en la región de corte y saturación. Debido a las deducciones del capítulo 3 (curvas par velocidad) se decidió suministrar un voltaje de armadura máximo igual a 12 V.

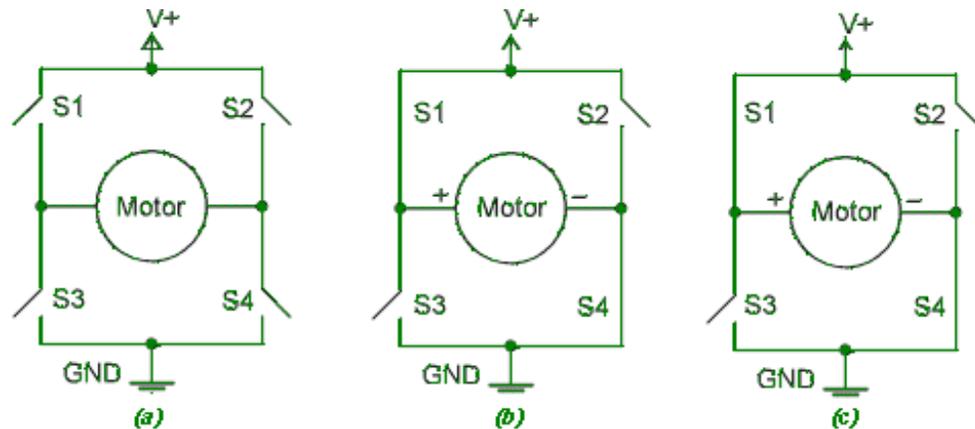


Figura 37: Operación de los transistores

Para lograr 12 V en la armadura del motor a partir de la salida del convertidor AC-DC expuesto, es necesario encontrar los valores correspondientes de las resistencias R7, R8, R9 Y R10 de la Figura 36, así como tener en cuenta las características de saturación de cada uno de los dispositivos involucrados. La Tabla 7 muestra las características de los transistores de potencia en la región de corte y saturación.

Tabla 7: Especificaciones de corte y saturación del TIP 122

PARAMETROS DE CORTE DE LOS TRANSISTORES TIP122				
Característica	Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Voltaje colector emisor de corte ($I_c = 30\text{mA}$ $I_b = 0\text{ mA}$) ($I_c = 5.0\text{A}$ $V_{ce} = 3.0\text{V}$)	V_{ce} (su)	100		V
Corriente de colector de corte ($V_{ce} = 50\text{V}$ $I_b = 0\text{ mA}$)	I_{ceo}		0.5	mA
Voltaje base-emisor de saturación ($I_c = 3\text{ A}$ $V_{ce} = 3\text{V}$)	$V_{be}(\text{sat})$		2.5	V

PARAMETROS DE SATURACION DE LOS TRANSISTORES TIP122				
Característica	Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Ganancia de corriente DC (Ic= 0.5A Vce=3.0V) (Ic= 5.0A Vce=3.0V)	hfe	1000		
Voltaje colector-emisor de saturación (Ic=3 A Ib =12 mA) (Ic=5 A Ib =20 mA)	Vce(sat)		2.0 4.0	V
Voltaje base-emisor de saturación (Ic=3 A Vce =3V)	Vbe(sat)		2.5	V

Para ello, considere una corriente fluyendo por la armadura del motor en el circuito de la Figura 36 como lo muestra la Figura 38. La unidad PWMIC1 de esta figura (pintada en amarillo) suministra una corriente instantánea de excitación en las bases de los transistores P1 y P4 (pintados en amarillo), que los coloca en estado de saturación. Si se considera un transistor equivalente con una ganancia de corriente producto de las ganancias de los transistores individuales el circuito de la Figura 38-a puede ser aproximado al de la Figura 38-b.

Suponga que la variación de la corriente es despreciable y, por ende, la caída de tensión en los bobinados debido a ello es despreciable. Tomando en cuenta los parámetros de trabajo de la Tabla 7 en las mallas de voltaje del circuito, se formulan estas como sigue:

$$V_{cc} = V_{ce_{sat1}} + i_c * R + K_e * W_m + V_{ce_{sat4}}$$

Ec. 18: Malla de voltaje 1-Convertidor modo suiche.

Supongamos $W_m = 0$ (arranque del motor), entonces de *Ec. 18* puede escribirse la corriente de saturación en las bases, como lo muestra *Ec. 19*:

$$i_{bSAT} = \frac{V_{cc} - V_{ce_{sat1}} - V_{ce_{sat4}}}{R * \beta_D} \quad (\text{Ib9 y Ib8})$$

Ec. 19: Corriente de base rotor bloqueado

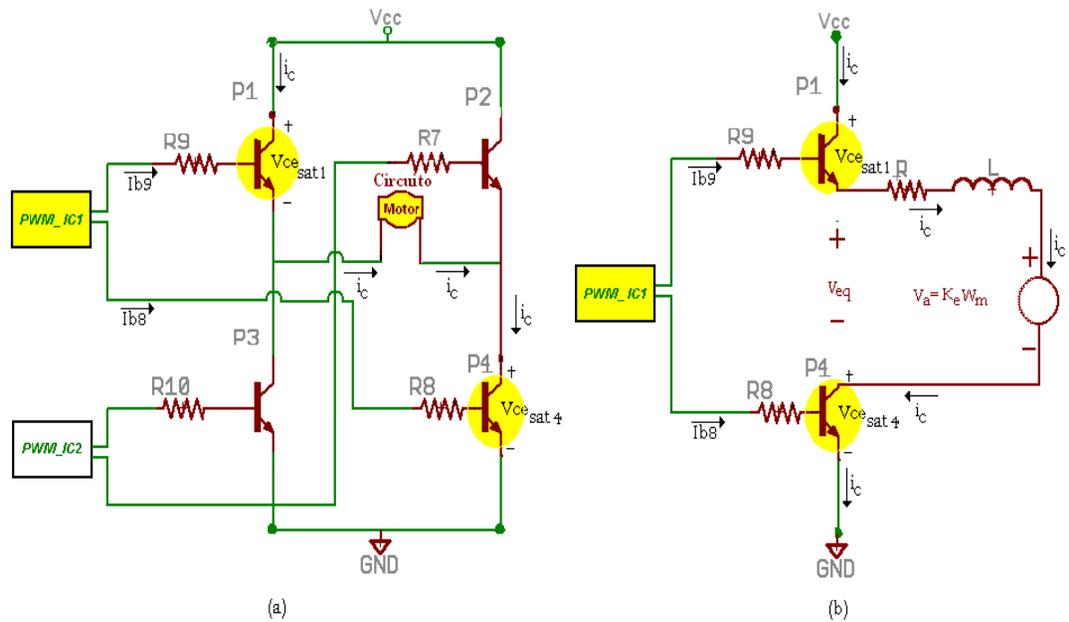


Figura 38: Excitación de un puente H.

Remplazando de la Tabla 7 y de los parámetros del motor expuestos en el capítulo 3 se tiene:

$$i_{bSAT} = \frac{\text{tensionMotor}}{R * \beta_D} = \frac{16 - 4V}{700\Omega} = \frac{(12)V}{700\Omega} = 17.0 \text{ mA} > i_{bSAT} (12\text{mA})$$

Desde luego el nivel más alto lo define la corriente de colector que se presenta en la hoja de especificaciones. Para que los transistores P1 y P4 de la Figura 38-b estén en saturación, las corrientes de las bases deben ser por lo menos de 12 mA, para una corriente de saturación de colector de 2 A. Sin embargo, se consideró que la velocidad de rotación era igual a cero. Para valores de velocidad diferentes de cero, la corriente de saturación de colector es menor y en consecuencia el diseño mostrado continúa siendo válido. Para demostrarlo en este caso, hay que remitirse a las curvas expuestas en el capítulo 3, en las (Curvas-par velocidad del motor 82890) para explorar las condiciones de trabajo. Estas curvas se especifican y amplían en la Figura 39 en una alimentación de 0 a 12 V (Salida DC de la fuente implementada en el accionamiento). Se observa que las velocidades de trabajo para diferentes voltajes de alimentación son diferentes de cero entre 0 y 20 Nm de par; por consiguiente, como el voltaje V_a es proporcional a la velocidad existe una fuerza contraelectromotriz en los devanados que evitará que fluyan corrientes elevadas.

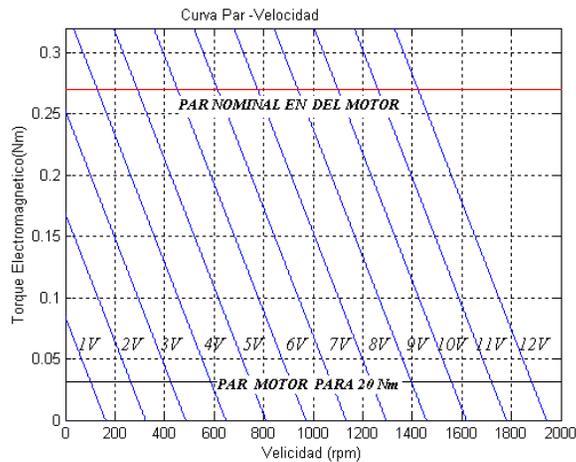


Figura 39: Curva par velocidad del motor 82890.

Se nota en la Figura 39 que una parte del voltaje de alimentación origina una caída debido a la velocidad y la corriente de base de saturación será menor debido a que se necesitara menos corriente de colector para alcanzar el potencial de saturación en la carga y en los transistores. Se aclara que la fuerza contraelectromotriz depende directamente de la velocidad y no de los valores instantáneos de voltaje en la armadura del motor.

Una vez sabemos cual es la corriente de base que saturará los transistores se debe encontrar el dispositivo y configuración que suministre esa corriente precisa. El circuito que ejecuta esta función se muestra en la Figura 40. Este circuito además de amplificar las señales PWM, aísla mediante un opto-acoplador las fuentes de energía que proveen la potencia al circuito del motor y al dispositivo lógico que contiene la unidad PWM.

Se formulan las mallas respectivas:

Malla inferior:

$$V_{cc} = V_{ce_{sat5}} + i_{b8} * R8 + V_{be_{sat4}}$$

Ec. 20: Malla de voltaje 2- Convertidor modo suiche.

Malla superior:

$$V_{cc} = V_{ce_{sat5}} + i_{b9} * R9 + V_{be_{sat1}} + i_{b9} * \beta_D * R + V_{ce_{sat4}}$$

Ec. 21: Malla de voltaje 3-Convertidor modo suiche.

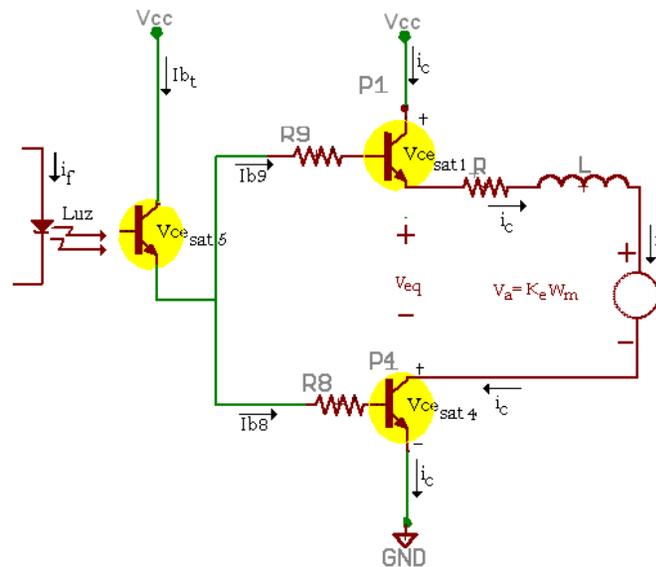


Figura 40: Excitación de un puente H y circuito opto-acoplador.

De ecuación **Ec. 20** y **Ec. 21** se deducen las resistencias de las bases, así:

$$\frac{V_{cc} - V_{be_{sat4}} - V_{ce_{sat5}}}{i_{b8}} = \frac{17V - 2.5V - 1V}{15.0mA} = 833\Omega = R8 \quad y$$

$$\frac{V_{cc} - V_{ce_{sat5}} - V_{be_{sat1}} - V_{ce_{sat4}} - i_{b9} * \beta_D * R}{i_{b9}} = R9$$

$$\frac{16V - 1V - 1.5 - 2V - 10.5V}{15mA} = 66\Omega = R9$$

Como cualquier corriente de base por encima del nivel de **lbsat** satura el transistor las corriente **If** debe ser mayor que **lbsat / B optoacoplador** y en base a las especificaciones de la Tabla 8, se debe inducir $I_f > 0.75 \text{ mA}$

4.6 LA PLANTA Y EL SISTEMA DE CONTROL.

Esta sección se ocupará de complementar y en algunos casos definir la dinámica de los bloques involucrados en el funcionamiento del accionamiento. Estos componentes pueden dividirse según su aporte en dos grandes campos que son la planta y el sistema que los controla. Aunque en la sección anterior se explicó el efecto que tiene el sistema de potencia en el motor, no se explicó como es el controlador. Entonces en adelante se trabajará este problema, la estrategia y

método de control encargado de llevar la salida del motorreductor hasta algún par deseado.

Tabla 8: Especificaciones de saturación del optó-acoplador de referencia 4N28.

PARAMETROS DE SATURACION DEL DISPOSITIVO 4N32				
Característica	Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
Ganancia de corriente DC ($I_c = 0.5A$ $V_{ce} = 3.0V$) ($I_c = 5.0A$ $V_{ce} = 3.0V$)	hfe	20		
Voltaje colector-emisor de saturación	$V_{ce}(sat)$		1	V

Los sistemas de control digital son muy usados hoy en día debido a su fácil implementación y a la posibilidad de realizar algoritmos de cualquier lógica-matemática, que pueden ser ejecutados a frecuencias elevadas con los procesadores que encontramos hoy en día. Un esquema de control de lazo cerrado digital es como el que se muestra en la Figura 41.

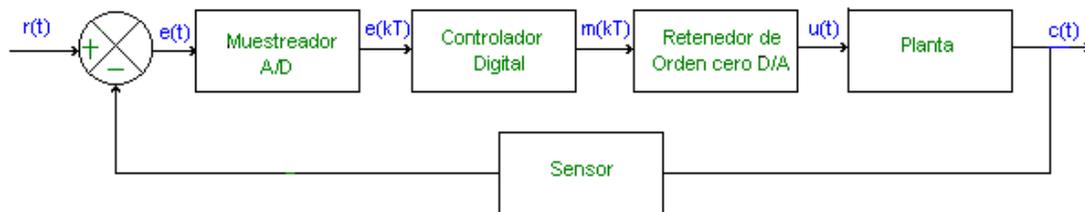


Figura 41: Sistema de control digital- Caso general

En este sistema la señal $c(t)$ se retroalimenta para ser comparada con la señal de entrada $r(t)$. De esta comparación se deduce y muestrea el error que en general es $e(t) = r(t) - c(t)$. Cuando esta señal ya es digital, se alimenta hacia el controlador el cual ejecuta un algoritmo que depende de la secuencia muestreada $e(kT)$ para producir $m(kT)$.

La función de salida $m(kT)$ con base a $e(kT)$ se especifica mediante la función matemática del controlador digital. La elección adecuada de polos y ceros (Relacionados directamente con coeficientes de m y e) hace posible generar características deseadas de entrada – salida.

La forma general de esta ecuación del controlador es :

$$m(k) + a_1 * m(k - 1) + a_2 * m(k - 2) + \dots + a_n * m(k - n) \\ = b_0 * e(k) + b_1 * e(k - 1) + \dots + b_n * e(k - n)$$

Ec. 22: Ecuación general de un controlador digital

El controlador PID es una de las técnicas de control más usadas con éxito en el mundo. Este actúa sobre la variable a ser manipulada con la combinación de tres acciones de control que dependen del error. Para la implementación del controlador, el PID ha sido realizado en su forma digital sobre la memoria de programa del PIC 18F452 y su salida es transferida a las unidades de CAPTURE/COMPARE/PWM que poseen el microcontrolador. La unidad PWM es hardware adicional que posee el microcontrolador; este basa su funcionamiento en temporizadores independientes cuyo incremento se basa en el reloj central proporcionado por el oscilador del microcontrolador.

4.6.1 Definición de la planta. El funcionamiento del accionamiento ha sido representado mediante las señales y diagramas de bloques descritos en la misma figura y se definen a continuación.

4.6.2 Descripción de señales. Se describen las señales del diagrama de bloques del accionamiento como sigue:

r(t): La señal de referencia es calculada a partir de los algoritmos y ecuaciones en diferencias que se describen en el anexo C. Estos algoritmos calculan el valor deseado con base a los parámetros introducidos por el usuario.

Su rango va desde (0-99 Kg) pero realmente estos valores son transformados y su representación en señales procesadas son de 10 bits (0-1023), debido a la resolución del Hardware involucrado.

e(kT): Es la diferencia entre la palabra de 10 bits que representa la fuerza deseada y la fuerza medida.

m(kT): Es la señal calculada por el algoritmo de control para un instante kT .

u1(t): Es el ciclo útil de la señal PWM proveniente del modulo COMPARE/CAPTURE/ PWM del microcontrolador. Esta señal varía entre 0 y 1 y posee una resolución de 10 bits.

$\bar{u}(t)$: Es una señal promedio amplificada por el convertidor expuesto en la sección anterior. El factor de amplificación puede ser encontrado como sigue:

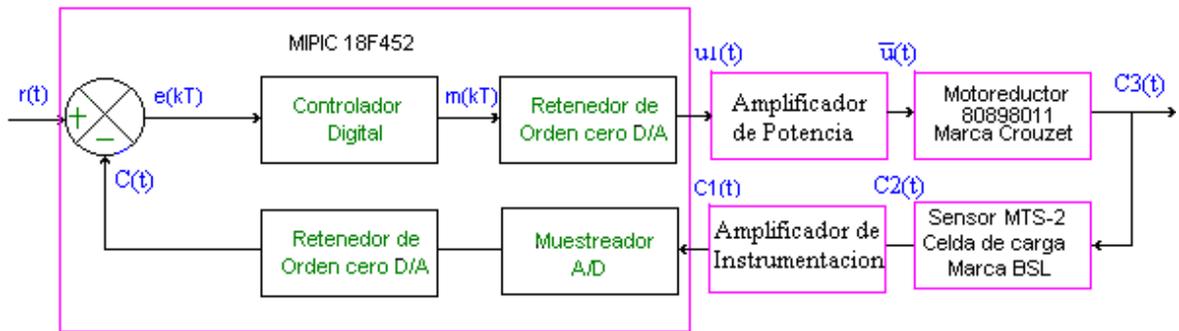


Figura 42: Diagrama de bloques equivalente del accionamiento eléctrico.

Los valores promedios aplicados a los devanados es una señal de entre 0 y 12V y el ciclo útil de la señal PWM varía entre 0 y 1 entonces, la ganancia del circuito de potencia puede ser expresada así:

$$K_{PWM} = \frac{V_{\max_out} - V_{\min_out}}{da_{\max} - da_{\min}} = \frac{12V}{1} = 12$$

Donde **da** es el ciclo útil de la señal PWM.

c3(t): Es la señal aplicada al cuerpo humano por el motor y sensada por la celda de carga. Su rango es de 0 a 100Kg.

c2(t): Es la señal eléctrica equivalente a la fuerza vista por la celda de carga. La salida la celda es de 3.0001 mv/V.

c1(t): Es la señal eléctrica equivalente a la fuerza vista por la celda de carga. Su Rango esta establecido entre 0 y 5 V.

c(t): Es la señal digitalizada por medio de un conversor análogo-digital de 10 bits embebido en el MIPIC18F452.

4.6.3 Descripción de bloques. Se describen las señales del diagrama de bloques del accionamiento como sigue:

4.6.3.1 Definición del controlador. En principio se había propuesto la implementación de un controlador PID y Fuzzy para el control del sistema, en donde el controlador Fuzzy se encargaría de suministrar las constantes al controlador lineal PID. Sin embargo pruebas consignadas mas adelante en este capitulo demostraron que con un PI se obtenía una óptima respuesta del sistema descrito en Figura 42. En consecuencia en adelante el control se estudiará para un PI.

El controlador PI es básicamente una ecuación en diferencias cuya estructura debe ser resultado de la discretización de un PI analógico. En su implementación es oportuno analizar el ciclo de algoritmo dentro del ciclo del procesador, que es proporcional a la longitud del programa, al ciclo de conversión y este a su vez es también proporcional al reloj que usa la conversión (sin el uso de interrupciones), que en el PIC 18F452 es de 2 a 64 Tosc. (Tosc = Tiempo del oscilador = 1/40 Mhz)

Las constantes del controlador dependen del tiempo de muestreo y de las constantes de tiempo del sistema. Para el tiempo de muestreo se debe considerar la frecuencia de oscilación y el reloj de conversión de ADC, que es seleccionable por el usuario. El principio del controlador **PI** cuya expresión en el dominio del tiempo se expone en la *Ec. 23*, es que actúa sobre la variable manipulada con acción proporcional (Proporcional al error actuante) e integral (Proporcional a la integral del error actuante). El esquema PI es muy usado y una calibración adecuada conlleva a obtener una respuesta precisa debido a que su combinación permite obtener una respuesta con error de estado estable cero y unas características de estado transitorio aceptables.

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right]$$

Ec. 23: Ecuación de un controlador PI analógico

Donde: **e(t)** es el error actuante; **m(t)** es la salida del controlador; **K** es la ganancia Proporcional y **Ti** es el tiempo integral o tiempo de reajuste.

Dado que es necesario implementar el algoritmo de control **PI** en forma digital, la *Ec. 23* en su forma analógica es discretizada, en su parte integral mediante el principio de aproximación trapezoidal. Las ecuaciones en diferencias resultado de de este proceso documentado en el anexo A., se muestran en la *Ec. 24*.

$$G_D(Z) = \frac{m(z)}{e(z)} = Kp + Ki \frac{1}{1-z^{-1}}$$

Ec. 24: Ecuación de un controlador PI digital

De la *Ec. 24* se deduce la ecuación en diferencias implementada en el controlador como sigue:

$$G_D(Z) = Ui(KT) + Up(KT)$$

Ec. 25: Ecuación en diferencias de un controlador PI

Donde:

$$U_i(KT) = U_i((K-1)T) + K_i * e(KT) ; \quad \text{con } K_i = \left(\frac{KT}{T_i} \right)$$

$$U_p(KT) = K_p * e(KT) ; \quad \text{con } K_p = \left(K - \frac{KT}{2T_i} \right)$$

4.6.3.2 Retenedor de orden cero. El microcontrolador posee dos **retenedores de orden cero** hardware; el primero funcionando en el proceso de conversión y el segundo en el proceso de control. El primero se conecta una vez finalizado el proceso de muestreo y el segundo una vez finalizada la puesta de la acción de control para un instante determinado. Esto permite mantener las señales sensadas y de control entre los instantes de muestreo. Recordemos que la ecuación matemática que define un circuito de retención es :

$$h(kT + \tau) = a_n + a_{n-1} * \tau^{n-1} + \dots + a_1 * \tau + a_0$$

Ec. 26: Ecuación de retención

Donde $0 \leq \tau < T$. Si **n = 1** se conoce como un retenedor de orden 1. Si **n = 2** se conoce como un retenedor de orden 2. Note que estos circuitos necesitan **n+1** anteriores datos para generar para generar la señal $h(kT + \tau)$.

Luego el retenedor de orden cero es :

$$h(kT + \tau) = x(kT)$$

Ec. 27: Retenedor de orden cero.

4.6.3.3 El circuito de potencia y el motorreductor. La descripción de los diagramas respectivos se describió en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3.

4.6.3.4 El sensor y el amplificador de instrumentación. Los componentes sensor y amplificador de instrumentación actúan en conjunto para suministrar una señal con el nivel preciso para que el conversor análogo digital pueda digitalizarla. La señal a digitalizar se ha referenciado a la de la fuente a alimentación del microcontrolador, es decir, a 5 V.

La celda de carga suministra su salida dependiendo del voltaje de alimentación que se le suministre y de la salida nominal que posea. La Tabla 9 muestra las especificaciones de la celda de carga incluida al proyecto. Su salida nominal es 3.0001 mv/v, que significa que la celda entregará 3.0001 mv por cada voltio de alimentación. Su salida máxima en esa alimentación se da con 100 Kg de carga.

Tabla 9: Especificaciones de la celda de carga

Especificaciones generales	Unidad	Datos técnicos
Salida Nominal	mv/v	3.0001
Alinealidad	% FS	0.03
Histerisis	% FS	0.03
Repetibilidad	% FS	0.02
Creep	% FS/30min	0.03
Balance de 0	% FS	1.0
Coeficiente de temperatura en 0	% FS/10 °C	0.03
Coeficiente de temperatura en carga	% FS/10 °C	0.03
Resistencia de entrada	Ω	385
Resistencia de salida	Ω	352
Resistencia de aislamiento	M Ω	≥ 5000
Tensión de excitación	V	10(DC/AC)MAX:15(DC/AC)
Rango compensado de temperatura	°C	-10~+50
Temperatura limite	°C	-20~+60
Coeficiente de sobrecarga	%FS	150

En este proyecto la celda ha sido alimentada con 5V, lo que significa que genera una salida de 15,0005 mv en 100 Kg. Es evidente que esta señal debe ser amplificada hasta obtener una señal igual al valor máximo de la referencia del convertor en una excitación de 100Kg. El circuito del amplificador implementado es mostrado en la Figura 43.

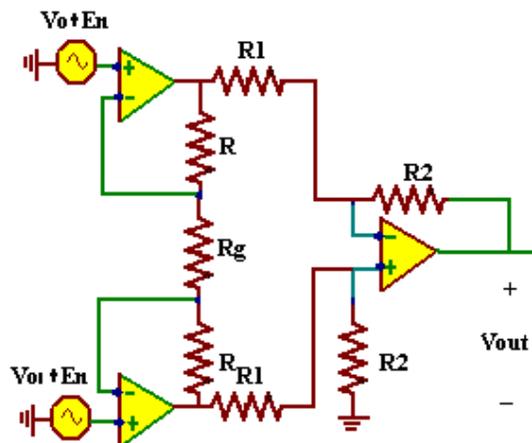


Figura 43: El amplificador de instrumentos

Este circuito es estudiado en el anexo A de este documento. Así en condiciones precisas la ganancia del amplificador es:

$$G = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)$$

Ec. 28: Ganancia del amplificador

Como se debe obtener un voltaje de 5V voltios a la salida del amplificador cuando la celda experimenta 100 Kg entonces la ganancia del amplificador de acuerdo a la Figura 42 debe ser igual a:

$$C1(t) = C2(t) * G$$

Remplazando el valor máximo se obtiene la ganancia como sigue:

$$G = \frac{C1(t)}{C2(t)} = \frac{5V *}{15,0005mv} = 333.32\Omega$$

Se escoge el valor de R =24 K y el valor de Rg es entonces:

$$R_g = 2 * R / (G - 1)$$

$$R_g = 2 * 24K / (332.32) = 144.43$$

Para obtener este valor lo más aproximado posible, se ha incluido un potenciómetro “trimer” en las tarjetas electrónicas.

4.7 EL SISTEMA DE CONTROL. La representación del sistema de control es mostrada en la Figura 45. Las constantes de integración del PID fueron encontradas por el **método del tanteo** (ensayo y error) tomando en cuenta los resultados experimentales de lazo abierto y a partir de la simulación en el entorno de Matlab. En la Figura 44 se muestran 2 pruebas de lazo abierto de la maquina real (no simulada) para ciclos útil de 17% y 50 %. En la Figura 44-a se muestra la respuesta (kilogramos) a un ciclo útil de 17%, esta es muy semejante a la respuesta de un sistema de orden superior, su evolución es en forma de S. Cuando la fuerza alcanza su estado estacionario la fuerza en la carga disminuye debido a la posdeformación o elongación de la lona. Esto en control cerrado implica un disturbio continuo que debe ser corregido.

En la Figura 44-b se muestra la respuesta de lazo abierto para un ciclo útil de 50%; este ciclo util es quitado debido a que después de 1.8 minutos, pues la

salida del sistema alcanza su valor máximo. Nuevamente la no linealidad debido a la cuerda-lona o transmisión aparece, haciendo disminuir el par visto por la carga en la salida del reductor. Esta alinealidad no ha sido modelada en la simulación de matlab.

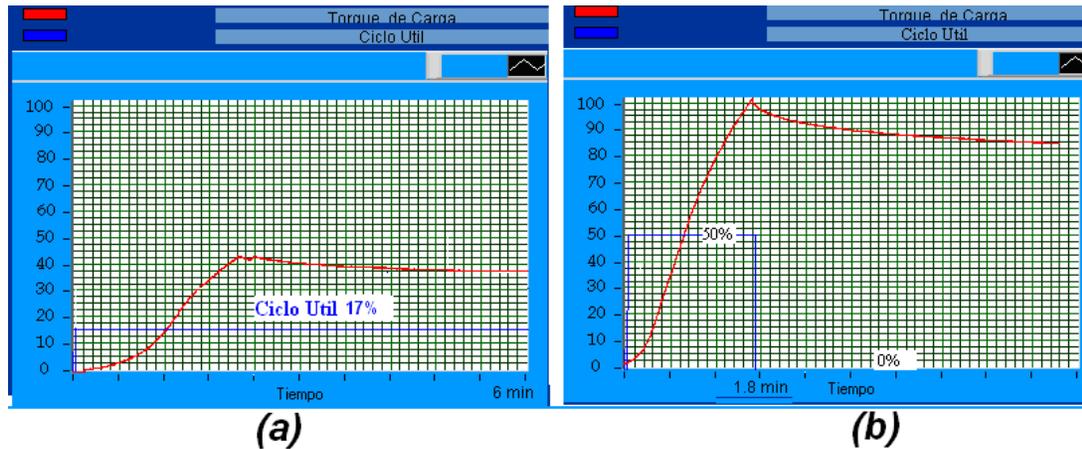


Figura 44: Pruebas de lazo abierto

De las pruebas experimentales aplicadas a una carga aproximada (No a la real), se deduce que el sistema posee varios polos, por su forma de respuesta en S, con sobreamortiguamiento, sin ningún efecto de ceros, pues no se evidencia razón de crecimiento o efecto de adelanto. Por tanto es posible afirmar en cierta seguridad que la señal de control puede ser proporcionada por un PI, pues el efecto derivativo está implícito en su comportamiento o curva de reacción.

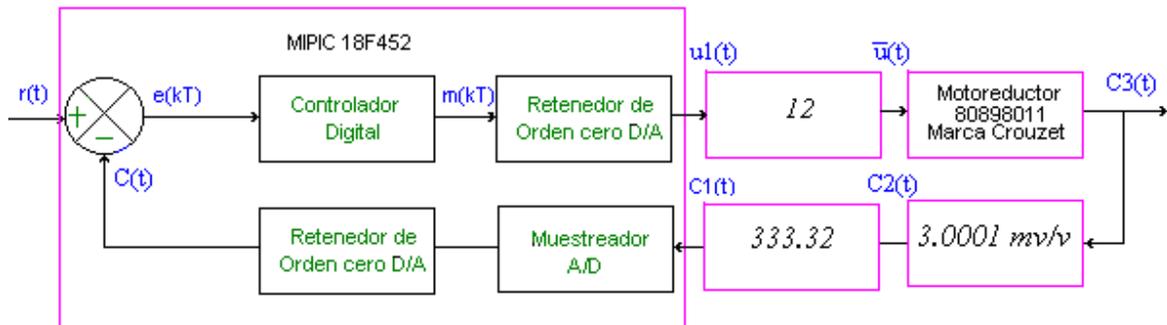


Figura 45: Diagrama de bloques control de lazo cerrado

A partir del modelo de la planta y su estudio ya expuesto y relacionado en la Figura 45, se simuló el lazo de control en el entorno de Matlab. El diagrama de bloques de esta simulación del lazo cerrado se presenta en la Figura 46.

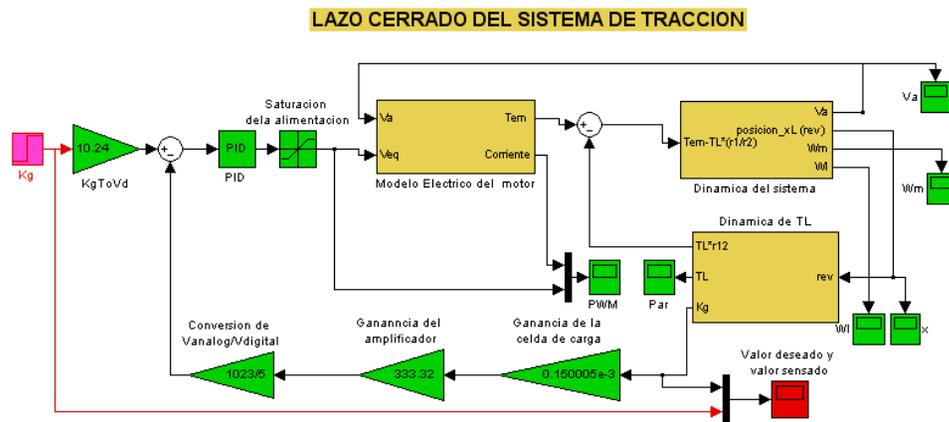


Figura 46: Sistema de control de la tracción

En este diagrama de bloques observan unas nuevas constantes y características que se explican como sigue:-

- $KgToVd$: Escalización necesaria entre el setpoint cuyo rango es (0-99.9) Kg y el valor digital que lo representa (0-1023). Su valor se obtiene como sigue:

$$KgToVd = \frac{Vd_Max - Vd_min}{Kg_max - Kg_M} = \frac{1023}{99.9} = 10.24$$

Ec. 29: Transformación entre la consigna y el valor digital equivalente.

- $Conversione\ de\ V_{analog}/V_{digital}$: Transformación necesaria entre la variable sensada, cuyo rango es (0 - 5) V, y el valor digital que la representa (0-1023). Su valor se obtiene como sigue:

Conversione de

$$V_{analog}/V_{digital} = \frac{Vd_Max - Vd_min}{V_{analog_max} - V_{analog_min}} = \frac{1023}{5v}$$

Ec. 30: Transformación entre la variable sensada (V) y el valor digital equivalente.

- $Ganancia\ de\ la\ celda\ de\ carga$: Ganancia de la celda de carga en nuestro diseño particular. Se deduce así :

Ganancia de la

$$celda\ de\ carga = \frac{Salida\ Nominal * Voltage\ Suministro}{100Kg} = \frac{3.0001\ mV/V * 5V}{100Kg} = 0,150005\ mV/Kg$$

- La ganancia del amplificador se dedujo en la sección 4.4.2.4.
- Saturación de la alimentación: Es la señal máxima y mínima que puede inducir el controlador en la armadura del motor. Para este caso un ciclo útil de 100% implica 12V y un ciclo útil de 0% implica 0 voltios.

4.7.1 Calibración del sistema de control. Una vez estructurado el sistema de lazo cerrado se procedió al diseño del controlador. Se tomaron en cuenta las consideraciones expuestas en seguida y se efectuó el procedimiento consignado a continuación.

Para encontrar el modelo lineal equivalente por métodos computacionales se usó la herramienta **matlab** con base al modelo de la planta expuesto en la Figura 42. El principio de esta técnica computacional es encontrar el modelo lineal alrededor de algún estado estacionario del proceso. Este estado estacionario es posible hallarlo mediante el comando de Matlab **Trim**.

Comando **Trim**:

$$[x, u, y, dx] = \text{trim}('.\text{sys}', x_0, u_i, y_0, [], []) \quad \text{ó} \quad [x, u, y, dx] = \text{trim}('.\text{sys}')$$

Ec. 31: Comando Trim.

El comando intenta encontrar los valores de los estados **x**, de las entradas del sistema **u**, de las salidas del sistema **y** y de las derivadas de los estados **dx**, de un diagrama de bloques de matlab. Esta función recibe el nombre del archivo a linealizar con extensión **.SYS** ubicado en la carpeta de trabajo. El usuario puede ejecutar este comando con información a priori de un estado estacionario supuesto **xo**, una entrada **ui** y un punto de partida de la salida **yo**.

El uso del comando **trim** no fue útil para este sistema, en consecuencia no se tuvo referencia a priori sobre el punto de operación. Pero existe otra manera de linealizar, basada en el conjunto de variables puestas por defecto en el diagrama de bloques obteniendo el modelo lineal en espacio de estado, mediante el comando **LinMod**.

Comando **LinMod**:

Obtiene el modelo lineal en espacio de estado.

Al ejecutar **[A,B,C,D] = linmod('ModeloMotor')**, sobre el diagrama de bloques "ModeloMotor", la solución computacional es la siguiente:

$$A = 10000 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.00015707963268 \\ 0 & -0.0666666667 & -3.579333 \\ -0.0002073840 & 0.0008821110 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 952.380928 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [120.214285718823 \quad 0 \quad 0] \quad D=0$$

Con el modelo lineal en espacio de estado, se encuentra la función de transferencia del sistema haciendo uso del comando **SS2TF**, este modelo es expuesto en la Ec. 33.

$$H(S) = C(sI - A) B + D = \text{SS2TF}(A, B, C, D)$$

Ec. 32: Conversión de espacio de estado a función de transferencia.

$$G(S) = \frac{730.4 \text{ Kg/V}}{0.00046046 * S^3 + 0.307 * S^2 + 145.4 * S + 1}$$

Ec. 33: Función de transferencia del sistema.

Antes de continuar con el diseño del controlador es necesario notar las características de la planta con base a lo hallado y sus respuestas. Con estas funciones se confirman algunas suposiciones acerca de la alta ganancia del sistema. Este modelo es muy útil, pues con la planta real no es posible obtener la respuesta mostrada en la Figura 47-a (Kilogramos), ya que existe un par de ruptura de 20 Nm. La respuesta del sistema hasta el par de ruptura es mostrada en la Figura 47-b (Nm) para una alimentación escalón de 12V. Acerca de la constante de tiempo del sistema se tiene alguna incertidumbre pues como ya se comentó, no se conoce en su totalidad la dinámica de la carga y a ella se une otra dinámica de la cuerda que tiene mucho que ver con este parámetro. Esta dinámica se ha mostrado en las pruebas de lazo abierto dispuestas en la Figura 44.

Como ya se conoce el efecto de la ganancia de la caja reductora implícita en la alta ganancia del sistema, se ha diseñado un controlador PI con características no lineales, es decir se ha desarrollado una serie de reglas para el control que consisten en reset total de la señal de control, cada vez que el sistema alcanza estado deseado por el usuario. En estas condiciones de ausencia de la señal de control y de corriente de armadura, el par de salida será mantenido por la mecánica o ganancia de la caja. Las reglas son básicamente las siguientes:

- La señal de control se resetea en errores dentro de una banda muerta.
- El controlador no induce acción de control alguna en la banda muerta; esto quiere decir que puede existir un error mínimo, sin corrección si la salida está dentro de esta banda. La banda se ha elegido igual 5 cuantizaciones del proceso de conversión, que equivalen aproximadamente a 500 gramos que, comparados con el rango de aplicación, es aceptable.

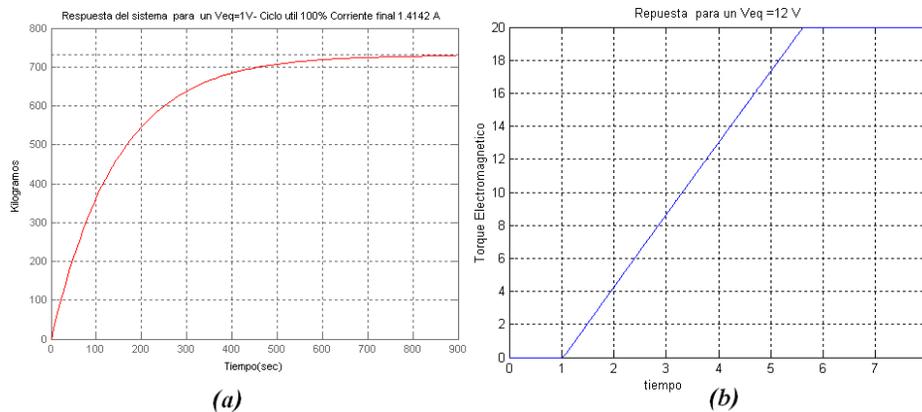


Figura 47: Respuesta al escalón del sistema lineal equivalente

Por otra parte, considerando la aplicación dada al equipo, esta difiere de una aplicación convencional pues no es necesaria siempre una acción de control mantenida; no obstante se ha diseñado el sistema basándose en los PI convencionales.

El controlador se ha diseñado apoyándose en la función de transferencia de la **Ec. 33** empleando el método de sustitución directa para una razón de asentamiento de un cuarto mediante el método de la ganancia última. Entonces se diseña el controlador con base a la ecuación característica del sistema de la Figura 48.

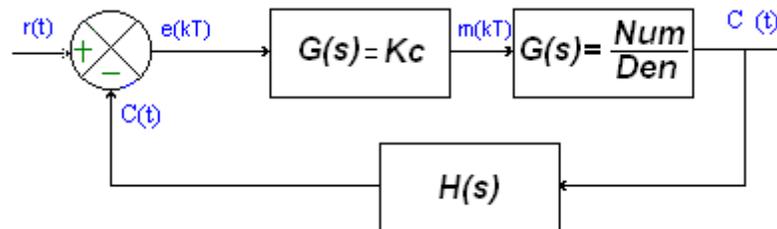


Figura 48: Control proporcional para obtener la ganancia y el periodo ultimo

$H(S)$ se obtiene a partir del diagrama de bloques de la Figura 46 como sigue:

$$H(S) = \frac{1023}{5} * 333.32 * 0.150005 * 10^{-3} = 10.22 \text{ cuatizacion / Kg}$$

G(s) es la función de transferencia hallada en la Ec. 33 y Kc es sustituido por la ganancia última Kcu.

La respuesta de lazo cerrado del sistema esta dada por:

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{10.24 * Gc(S) * G(S)}{1 + Gc(S) * G(S) * H(S)}$$

De la ecuación característica se obtiene:

$$den + Kcu * H(S) * num = 0$$

$$0.00046046 * S^3 + 0.307 * S^2 + 145.4 * S + 1 + Kcu * 10.22 * 730.4 = 0$$

Y sustituyendo $S = i * Wn$ y separando la parte real de la imaginaria se tiene:

$$-0.00046046 * Wn^3 + 145.4 * Wn = 0 \quad -0.307 * Wn^2 + 1 + Kcu * 10.22 * 730.4 = 0$$

Se encuentra:

$$Tu = \frac{2 * pi}{Wn} = \frac{2pi}{561rad / seg} = 11.2 \text{ mseg} \quad Kcu = 12.9$$

Y las constantes del PI analógico de la **Ec. 23** para una respuesta de asentamiento de un cuarto del sistema con ganancia última están dadas por:

$$Kc = \frac{Kcu}{2.2} = \frac{12.9}{2.2} = 5.9 \quad Ti = \frac{Tu}{1.2} = \frac{11.2}{1.2} = 9.3 \text{ mseg}$$

Ec. 34: Constantes del PI analógicas.

Y como las constantes digitales se relacionan con las constantes analógicas con la ecuación Ec. 25 y para que Kp sea positivo se de cumplir que $(2 * Ti > T)$, con $T = 15 \text{ mseg}$. Se tiene:

$$Ki = \left(\frac{Kc * T}{Ti} \right) = \frac{5.9 * 15}{9.3} = 9.5$$

$$K_p = \left(K_c - \frac{K_c * T}{2T_i} \right) = (5.9 - 9.5 / 2) = 1.15$$

Que para nuestro sistema implica un crecimiento rápido de la señal de control. Es por eso que se a partir de estos parámetros se ha realizado algunas variaciones en el tiempo de muestreo y en las constantes de crecimiento de la señal. Las variaciones de las constantes se realizan en base a la razón de crecimiento deseado de la acción del controlador y el efecto que esta tiene en el sobrepaso de la respuesta del sistema.

4.7.2 El método del tanteo. Debido a que los modelos en la mayoría de las ocasiones poseen impresiones para describir totalmente las dinámicas de la planta real, como es nuestro caso y como las constantes del controlador para la tracción del accionamiento han sido puestas en base al modelo lineal obtenido, ha sido necesario realizar variaciones alrededor de las constantes teóricas del controlador para obtener las constantes que producen la mejor respuesta del sistema. La lógica para efectuar las variaciones de las constantes en la planta en base a la experiencia obtenida es la siguiente:

Si se aumenta la acción integral se producen oscilaciones en la salida del sistema. Esto es más notable cuando la salida del sistema sobrepasa los 60 Kg.

Si se aumenta la acción proporcional se obtiene rapidez en la respuesta, sin embargo no se puede acrecentar en exceso este parámetro porque se obtiene inestabilidad.

La acción integral puede ser disminuida sin riesgo de inducir inestabilidad en el sistema, pero la velocidad de respuesta disminuirá.

Como el accionamiento no ha sido probado con cargas reales si no con un resorte de gran constante que se supone se comporta similarmente, puede ser posible que se necesite un reajuste del controlador para obtener una óptima respuesta del sistema. Esto se puede verificar si al efectuar la aplicación de un tratamiento la salida del sistema presenta variaciones de más de 1Kg con respecto al valor de la consigna. Si es así entonces ejecute el siguiente procedimiento:

- Cerciórese del tiempo que el sistema necesita para llegar a una consigna deseada.
- Disminuya la acción integral progresivamente hasta minimizar el sobre impulso de la respuesta. Esta verificación se puede realizar fácilmente en el modo de operación continua del sistema. (Ver anexo G: Manual de usuario).
- Si el tiempo de respuesta disminuye (tiempo obtenido en el punto 1), aumente la acción proporcional hasta en un 100 %.

Las constantes del controlador real son: $T=21$ mseg $Ki=9$ $Kp=2$. Para modificar la constantes del controlador abra el archivo: "Programas de maquina/Control/Proyecto3" del CD del proyecto y modifique la variable K_I y K_P según el procedimiento descrito. Cuando haya realizado las modificaciones retire el micro de control (Ver archivos de Eagles en la carpeta "Circuitos/Projects/Digital Accionamiento en el CD del proyecto") del impreso y utilice algún programador y baje el programa.

4.7.3 Pruebas del sistema de control. Con el sistema de control calibrado en base a las constantes halladas se obtuvieron los resultados con el sistema real. Estos muestran una óptima respuesta del sistema para variaciones en el punto de control. La señal de referencia se muestra en azul y la señal en rojo muestra la respuesta del sistema. En la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 se han aplicado tratamientos típicos usados en fisioterapia.

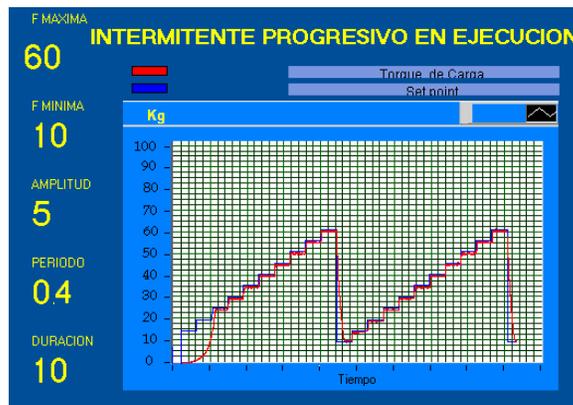


Figura 49: Prueba de lazo cerrado de un tratamiento intermitente –progresivo



Figura 50 Prueba de lazo cerrado de un tratamiento sinusoidal



Figura 51: Prueba de lazo cerrado de un tratamiento continuo.

4.8 DIAGRAMAS CIRCUITALES DEL ACCIONAMIENTO.

Las tarjetas electrónicas y conexiones han sido diseñadas por módulos, que permitieron separar y corroborar por etapas el funcionamiento electrónico. Así, existe una tarjeta que procesa la potencia hacia el motor, otra que administra las señales provenientes de todo el sistema digital y otra que amplifica la señal procedente del sensor. A continuación se presentan los esquemáticos de las tarjetas electrónicas implementadas.

4.8.1 Despliegue de variables. 3 circuitos impresos

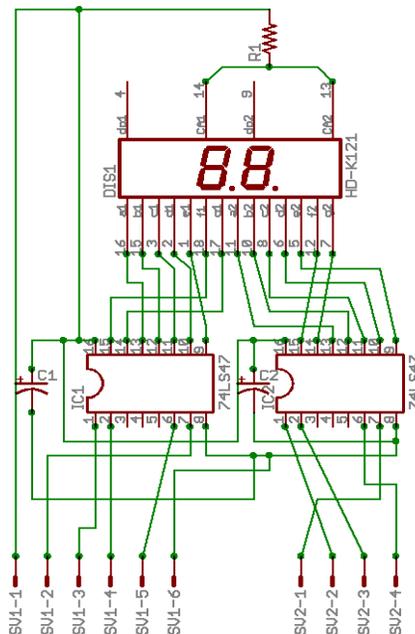


Figura 52: Esquemático del circuito de despliegue de las variables.

4.8.2 Amplificador de la señal del sensor.

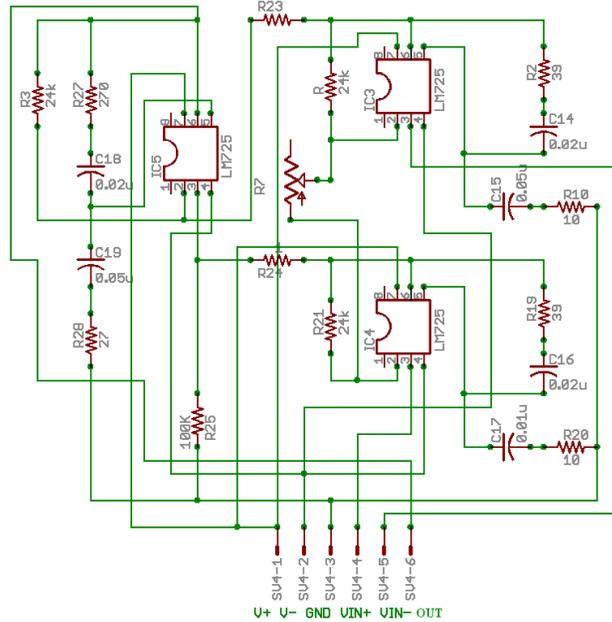


Figura 53: Esquemático del amplificador de instrumentación.

4.8.3 Amplificador de la señal de control.

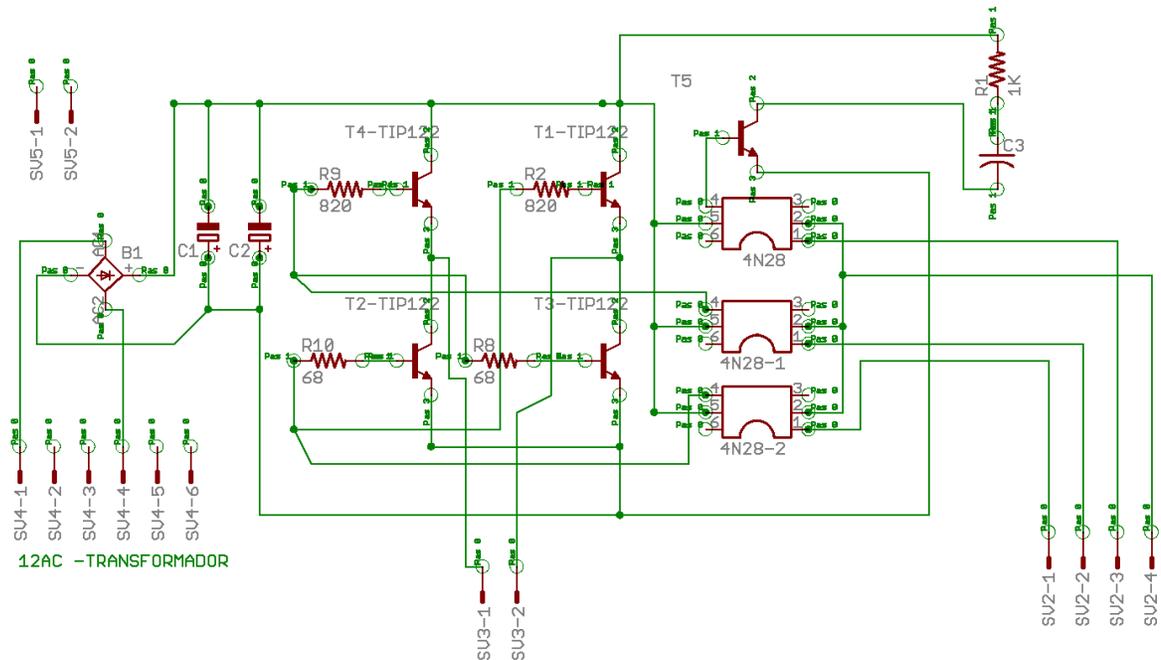


Figura 54: Esquemático de la tarjeta de potencia.

4.8.4 Circuito Principal.

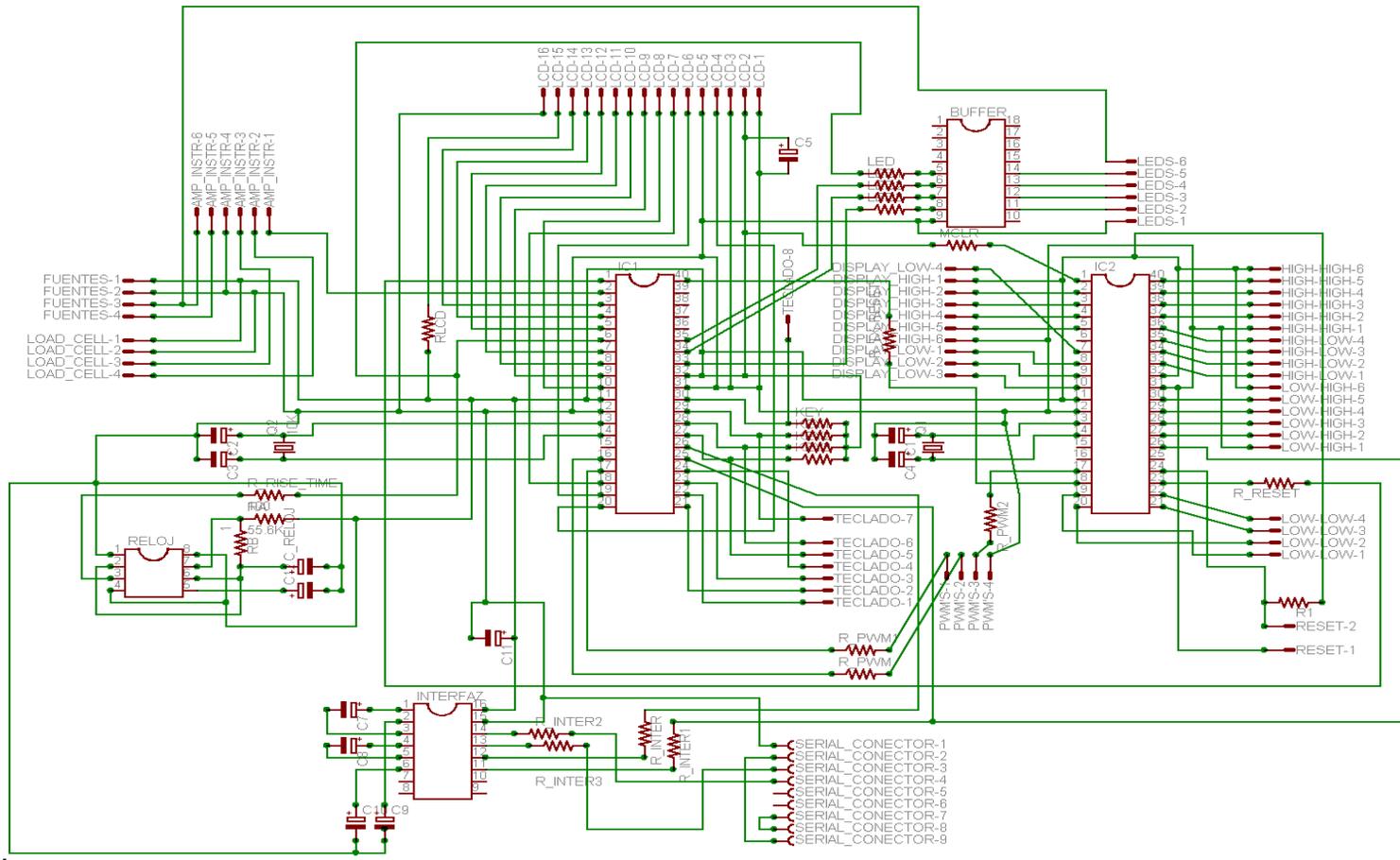


Figura 55: Tarjeta principal.

5. MODELACIÓN ARQUITECTÓNICA

En este capítulo nos ocuparemos de describir el diseño de la mecánica y arquitectura de la máquina y su conformación e interacción total con el entorno. Se ilustrará cada pieza con planos para posteriormente crear avistamientos globales de su arquitectura. Se consignan vistas de cada parte lo más detallado posible, sin embargo por cuestiones de legibilidad, por el tamaño de este documento, no se consignan todos los planos, pero pueden visualizarse en el Anexo D y además obtenerse en los archivos de Solid -Edge anexados en el CD del proyecto.

5.1 USO DE LA HERRAMIENTA CAD

Es impensable un diseño eficaz y rápido de máquinas y piezas de mediana y alta complejidad sin la ayuda de una herramienta CAD (Computer Aid Design: Diseño Asistido por Computador). La experiencia de este trabajo permite afirmar que no es necesario contar con alta tecnología para la manufactura de sistemas, pues es posible integrar diseños desarrollados con poderosas herramientas CAD a los talleres de fabricación locales. Lógicamente no se obtienen los mismos resultados que si se hiciera un trabajo con tecnología de alta precisión, pero los resultados son bastantes acertados.

El uso de los programas CAD han establecido fuertes ayudas en las diferentes etapas o elementos a considerar en el Diseño. Mediante su uso, se obtuvieron mejores diseños, y se optimizaron las etapas de construcción haciendo uso de cortes, superficies y perspectivas de diseño, se evaluaron espacios, formas, recorridos para obtener un sistema resistente y funcional.

Como herramienta CAD se usó Solid Edge para la modelación de la parte mecánica del accionamiento eléctrico para la tracción. Mediante esta simulación fue posible contrastar opiniones de la distribución espacial de los elementos, accesibilidad al sistema y de la estética final. Para lograrlo fue necesario iniciar la simulación con la modelación de las partes comerciales, pues a partir de estas se debe diseñar la totalidad del sistema. Estos componentes prefabricados son : Celda de carga marca BSL de 100Kg de capacidad, con protección de sobrecarga, un motorreductor marca Crouzet de referencia 80898011 de par max. 20 Nm, soportes de brida de rodamientos, la fuente de alimentación, etc.

Una vez las modelaciones de las partes comerciales fueron completadas, se hizo necesario realimentar este diseño de forma que lo diseñado corresponda 100% y desde ahí ya es posible establecer complementos de funcionalidad, seguridad y estética. Para lograr esta realimentación tan importante fue ideado un sencillo pero útil procedimiento así:

Se modelan las piezas con las medidas que envía el fabricante y las medidas inexistentes se toman con algún instrumento disponible. Posteriormente se generan las vistas necesarias en un plano y se configura el Hardware para imprimir 1:1. en línea fantasma (propiedad de la imagen en Solid Edge plano). Una vez se tenga esta plantilla se recorta la silueta, orificios y se compara con la faz de la pieza real: sino coincide es necesario tomar otra medida con el mismo u otro instrumento de mayor precisión hasta lograr una congruencia total.

En adelante se documenta el proceso de diseño del sistema en cada una de las piezas que lo conforman. El objetivo principal es acoplar las partes comerciales ya mencionadas con toda la estructura como se muestra en la Figura 56.

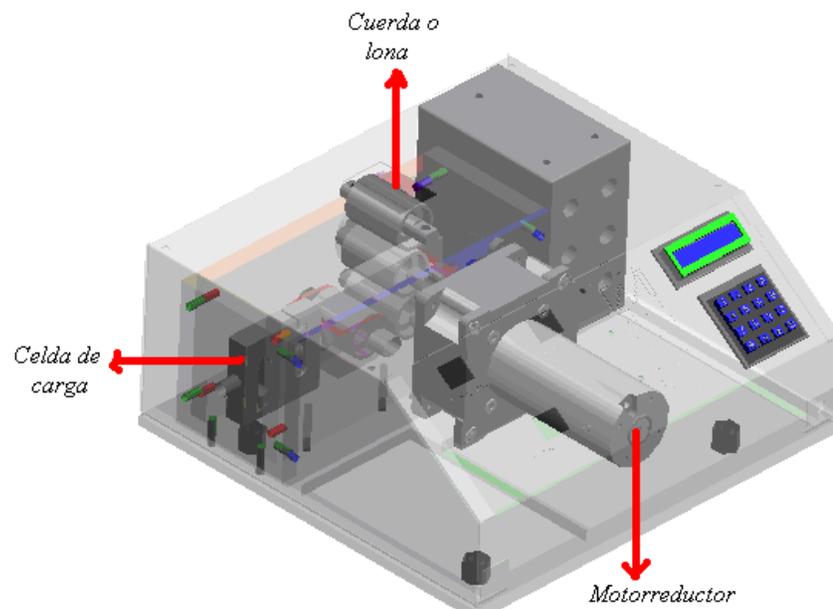


Figura 56: Arquitectura mecánica del accionamiento eléctrico

Se detalle entonces cada parte con sus características para posteriormente relacionarlas entre si hasta lograr el diseño completo.

En la Figura 57-a se muestra la vista virtual y en la Figura 57-b se muestra la vista en plano de la celda de carga de la perspectiva ISO de Solid Edge. En estas figuras es posible apreciar la posibilidad que brinda Solid Edge de convertir vistas de sólido a vistas de plano. Adicionalmente Solid Edge permite modificar la orientación y traslación espacial de la pieza modelada según el deseo y necesidad del diseñador, ofreciendo perspectivas de sólidos y planos en esa ubicación.

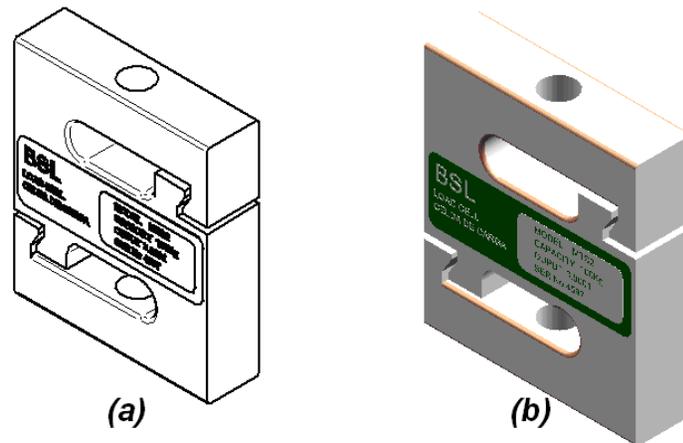


Figura 57: Vistas ISO de la celda de carga Marca BSL Sahilices.

5.2 MODELACIÓN DE LAS PARTES COMERCIALES: Es simple inducir que estos componentes son parte esencial para el funcionamiento y que una buena integración a la arquitectura hace que el diseño sea óptimo y exitoso, por eso fue necesario modelar con detalle su forma, tamaño y la ubicación de las sujeciones que no están incluidas en las especificaciones del fabricante. Más adelante se muestra varias distribuciones de los componentes que fue necesario realizar antes de encontrar la mejor distribución.

5.2.1 Planos de la celda de carga. En la Figura 58 se muestra la celda de carga y aspectos importantes que deben ser señalados.

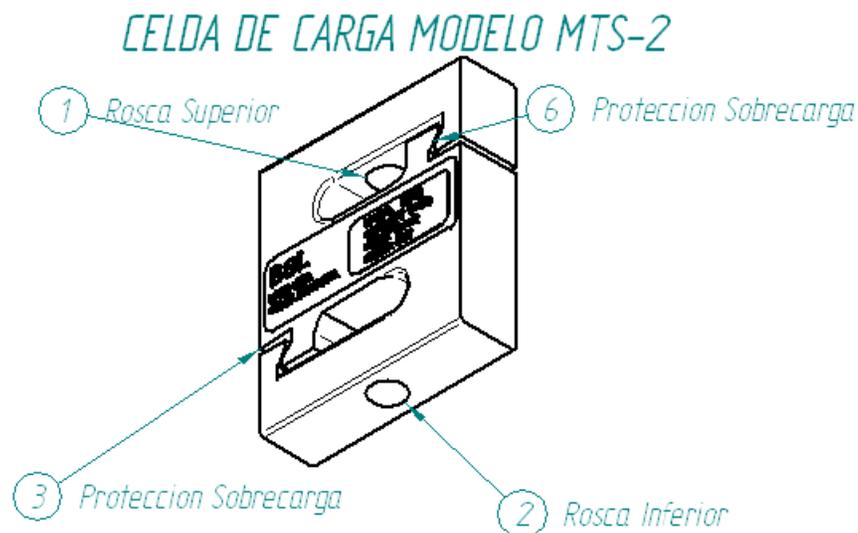


Figura 58: Vista plano de la celda de carga – Relevancias.

Se rotulan las roscas superior e inferior las cuales están centradas y opuestas a su centro de masa. Con respecto a su funcionamiento se resalta que la celda de carga para un buen desempeño, fidelidad y una alta duración, es necesario que experimente solo fuerzas centradas y paralelas a las paredes cilíndricas de las roscas y caras paralelas al rotulado que la acompañan. También se muestran diferentes vistas en plano y se señala la protección contra sobrecarga.

La celda de carga esta diseñada para tensión y con respecto a su arquitectura esta ofrece una importante característica adicional que es la protección contra sobre carga de modo que en el eventual caso que se aplique un fuerza mayor a 100 Kg la celda se deforma en un seguro mecánico (gancho superior e inferior) evitando su avería. La celda de carga ofrece protección mecánica solo hasta un 150% de su capacidad.

En la Figura 59 se muestra algunas vistas necesarias con las respectivas medidas en cm. La Figura 59 c muestra la protección de sobrecarga superior de la celda de carga; en esta figura se observa la celda de carga en su estado natural (sometida a 0 Kg.) Cuando la celda experimenta 100 Kg la superficies paralelas pintadas en rojo se apiñan evitando que el cuerpo de la celda se elongue fuera de los limites seguros. El mismo fenómeno tiene efecto en la parte inferior izquierda de la celda de carga. En las demás perspectivas se presenta su geometría y se ilustra la forma y sujeción.

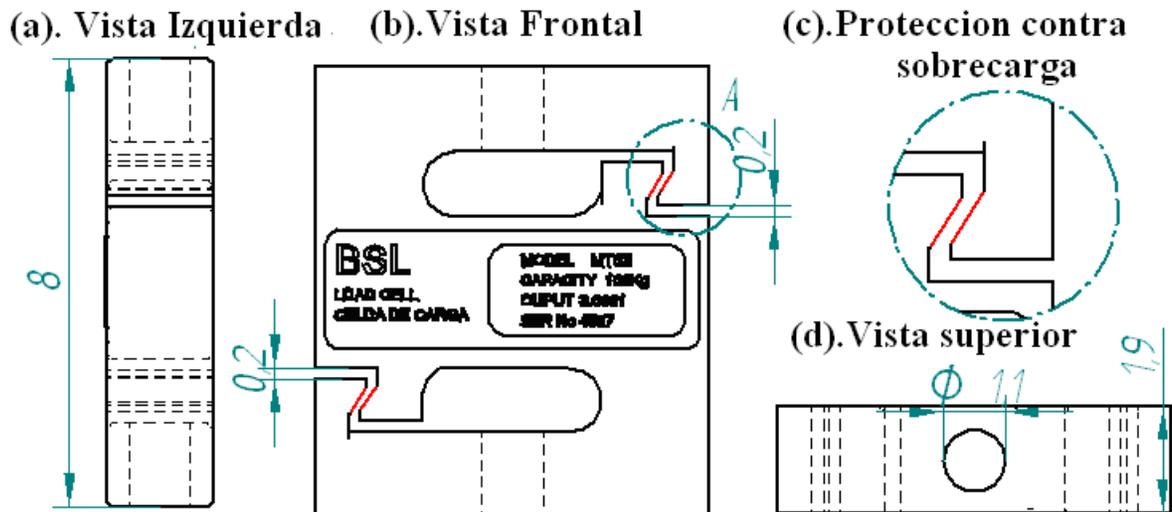


Figura 59: Vistas Plano- celda de carga.

5.2.2 Planos del Motorreductor DC Marca Crouzet ref. 80 898 0. Antes de mostrar los planos respectivos se menciona que los fabricantes del reductor no incluyen medidas importantes del motor, por tanto fue necesario esforzarse para

obtener las medidas. La Figura 60 muestra los componentes importantes que conforman el reductor y aportan a su funcionamiento de manera relevante. En esta se muestra el motor y reductor cuyas características están consignadas en el capítulo 3 de este documento. Adicionalmente se señala el eje del motor y una chaveta removible diseñada para facilitar el diseño de acople del motor al mecanismo sobrepuesto.

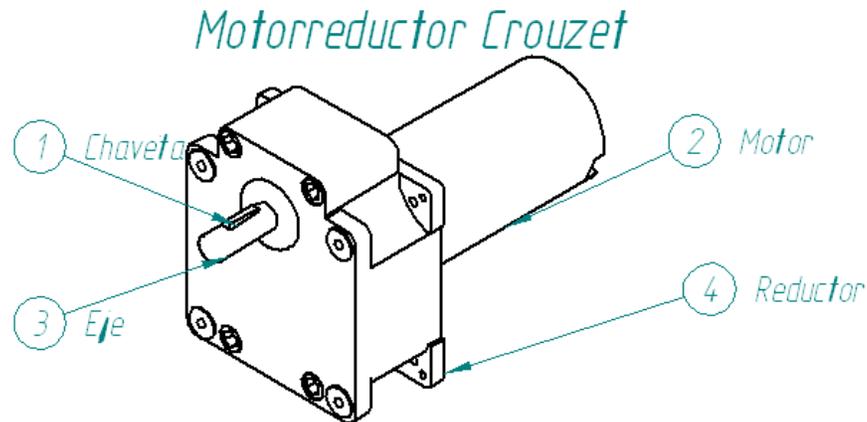


Figura 60: Vistas Plano- Motorreductor – Relevancias.

La Figura 61 muestra la vista lateral del reductor; en esta se aprecia sus medidas y cierta perspectiva para destacar la posición de este con respecto a los demás elementos. Note que la cota lateral neta dentro del espacio lateral ocupada por el mecanismo es aproximadamente 18.5 cm sin tener en cuenta la prolongación del eje diseñado para conectar el par del motor con la carga. Mas adelante veremos que esta longitud limita las posibilidades de distribución y a la vez define una ubicación espacial de todos los elementos.

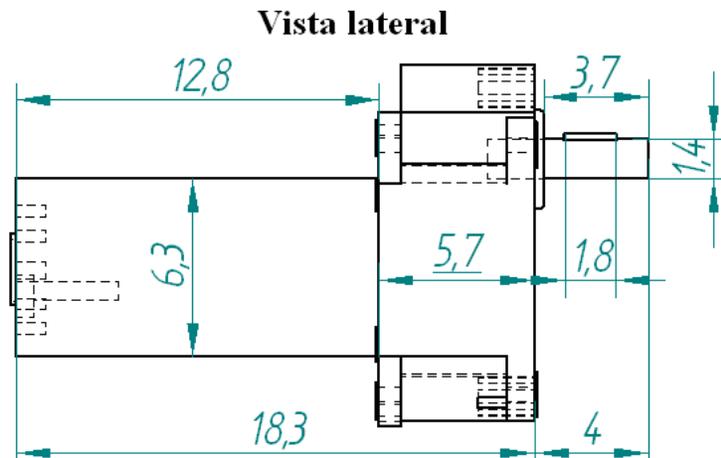


Figura 61: Vistas lateral – motorreductor.

En la Figura 62 se observan las vistas complementarias para comprensión de la arquitectura del motor. La Figura 62-a muestra la parte superior del motor, en esta vista se aprecia la chaveta y los orificios para sujeción de un encoder que es accesorio entre los productos Crouzet, que en este caso no será utilizado.

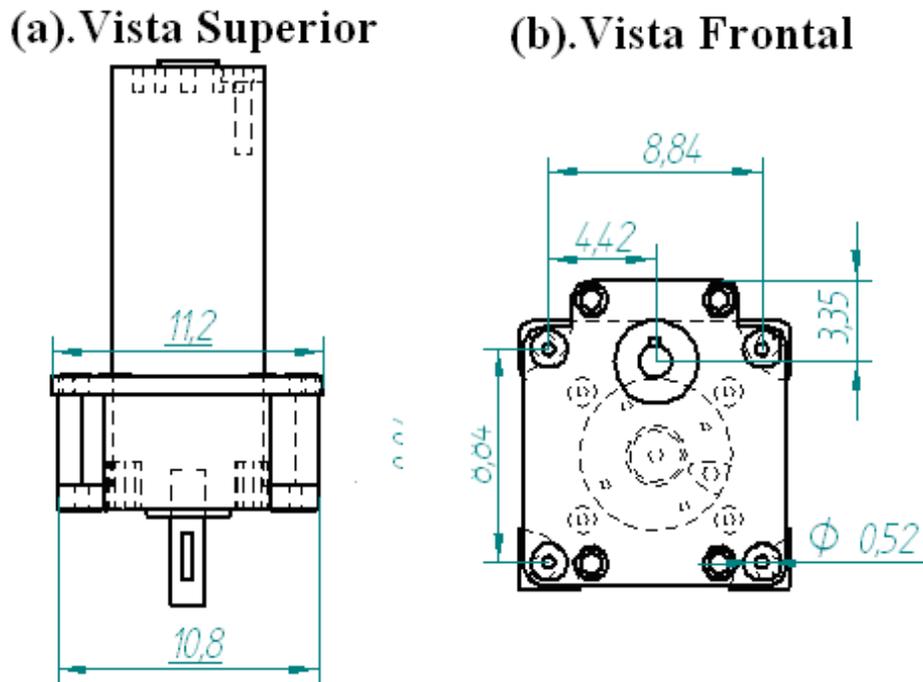


Figura 62: Vistas superior - frontal motorreductor

En la Figura 62-b se expone la superficie coincidente y base para la construcción de los soportes. En esta se aprecia las cotas expresadas con décimas de milímetro. El diseño CAD es un punto de partida importante para lograr construcciones, pues no es posible trazar bocetos a mano alzada cuando la geometría es expresada en décima de milímetros. En lo posible se trató que los operarios que llevaron a cabo la construcción del mecanismo no realizaran modificaciones y tareas de medición para que los resultados fueran acordes a lo diseñado, involucrando en el diseño el material de trabajo suficiente con siluetas, pistas para taladrado, vistas y cortes. Además, para asegurar la construcción de lo que se diseñó por este método, fue importante la presencia del diseñador para corregir cualquier error o posible cambio de lo que se diseñó.

5.3 DISEÑO Y MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA. El principal objetivo del diseño de esta estructura es propender de una estructura robusta, durable y modular apta para integrar el reductor, el sensor y aditamentos necesarios para conectar adecuadamente la carga al eje del reductor.

5.3.1 La extensión cilíndrica del eje. Para el diseño de la extensión del eje del motor, se parte del análisis matemático expuesto a continuación. La extensión cilíndrica se muestra en la Figura 63 pintada en azul.

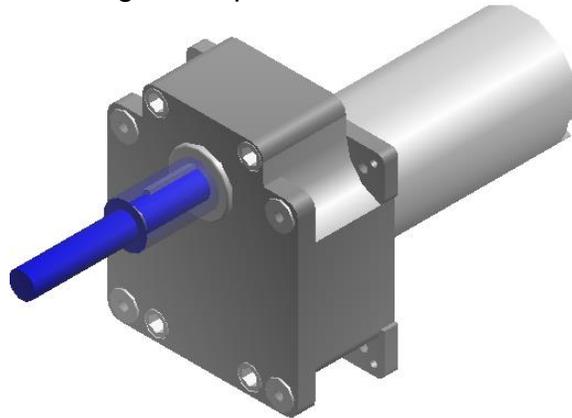


Figura 63: Estructura mecánica-Extensión del eje

Cálculo de la fuerza útil proporcionada por el motor. Hay que considerar minuciosamente el caso. Se tiene un reductor con diámetro en el eje de salida $D1 = 14 \text{ mm}$ (Radio $r = 7 \text{ mm}$) un reductor de par máximo $T_{\text{max}} = 20 \text{ Nm}$ para ejercer una fuerza menor o igual a $F = 100 \text{ Kg}$. El eje del motor no puede ser conectado a la carga y por ello es necesaria una extensión cilíndrica que contendrá al eje y transmitirá su fuerza, con radio exterior $D2 \geq 2.5 \text{ cm}$ de acuerdo a recomendaciones mecánicas recibidas. La situación se describe en la Figura 64.

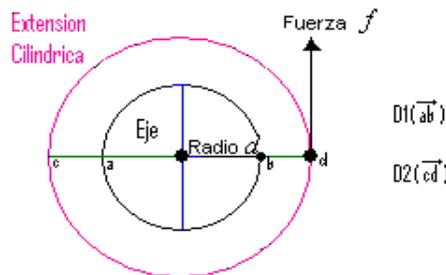


Figura 64: El par del reductor - Elección del radio de la extensión cilíndrica

La ecuación que define el par y la fuerza ejercida por el motor es:

$$\tau = f * \frac{1}{2} * D2$$

Ec. 35: Par del motor sobre la extensión cilíndrica

Donde f es una fuerza que forma 90° con el eje a una distancia de su centro y τ es el par. Note que el par proporcionado ejerce una fuerza tangencial. Consideremos las extensiones cilíndricas como las de la Figura 65. Si se usa la de la Figura 65-a, el par que deberá desarrollar el motor cuando sea necesaria la fuerza máxima igual a 100 Kg será:

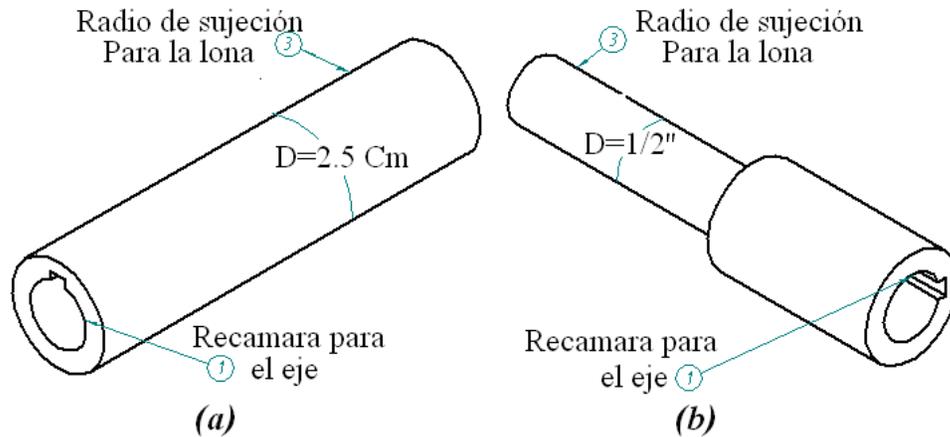


Figura 65: Extensiones cilíndricas.

De la **Ec. 35**. se tiene:

$$\tau = f * \frac{1}{2} * D \quad \tau = 100\text{Kg} * 10\text{m} / \text{S}^2 * \frac{1}{2} * 0.025\text{m} = 12.5\text{Nm}$$

Otros instrumentos mostraron la posibilidad de enrollar la cuerda 20 cm antes de ejercer el par, por tanto el nuevo par para el reductor, sabiendo que la lona tiene un espesor de 1.5 mm y debe dar aprox. 4 vueltas para enrollar 20 cm es:

$$\tau = 100\text{Kg} * 10\text{m} / \text{S}^2 * \left(\frac{1}{2} * 0.025\text{m} + 0.006\text{m} \right)$$

$$\tau = 100\text{Kg} * 10\text{m} / \text{S}^2 * (0.0155\text{m}) = 15.5\text{Nm}$$

Por precaución se sobre diseño debido a que no se había experimentado a priori con el reductor y se trabaja sobre el 75% de las especificaciones como factor de seguridad. Por ende los resultados de elegir la extensión cilíndrica de la Figura 65-a llevaría al motor a operar sobre los límites disminuyendo su ciclo de vida y creando riesgo de destrucción del mecanismo de reducción.

Es por eso que se optó por elegir la extensión cilíndrica de la *Figura 65-b* cuyo radio de salida fue elegido en pulgadas (1/2 pulgada), pues el rodamiento que se sobrepondrá es comercialmente fabricado en pulgadas. Así el par máximo exigido al motor para una fuerza de 100 Kg con la cuerda enrollada es:

$$\tau = 100\text{Kg} * 10\text{m} / \text{S}^2 * \left(\frac{1}{2} * 0.0127\text{m} + 0.006\text{m} \right) = 12.35\text{Nm}$$

Que estaría alrededor del 85% del factor de seguridad y cerca de 62% de las condiciones reales. Veamos la efectividad del par de la extensión cilíndrica no elegida sobre la extensión cilíndrica elegida y calculemos la fuerza en Kg que ejerce el reductor con el mismo par. El resultado es el siguiente.

$$f = \frac{2 * \tau}{\frac{1}{2}(D2) + Al} = \frac{15.5\text{Nm}}{0.01235\text{m}} \approx 1255\text{N} \approx 125.5\text{Kg}$$

Donde Al es el espesor adicional agregado a la extensión cilíndrica por las vueltas de lona.

Note que si escoge la extensión cilíndrica de la *Figura 65-a* en vez de la *Figura 65-b*, se exige al motor potencia innecesaria igual al 25% o 25 Kg aprox. Por eso se opta por la extensión cilíndrica de la *Figura 65.b*.

Extensión cilíndrica- dimensiones: Como se muestra en la *Figura 67*, la extensión cilíndrica debe contener el eje del reductor y a su chaveta por una recámara como se muestra en la vista lateral-corte A-A con la etiqueta de *cavidad*. Las paredes de la extensión en la parte que forma la recámara por recomendaciones mecánicas son de 0.5 cm y su longitud es 3.8 cm para cubrir la totalidad del eje. En la parte sólida de la extensión pintada en rojo y azul en la *Figura 66* la medida se deduce así:

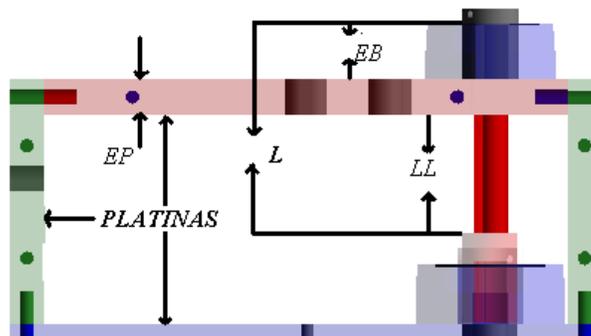


Figura 66: Extensión cilíndrica -dimensión

$$L = \text{Ancho_lona}(LL) + \text{espesor platina}(EP) + \text{espesor del soporte de brida}(EB)$$

Ec. 36: Longitud de la extensión cilíndrica en su sección sólida.

$$L = 4.9 + 1.5 + 2.95 = 9.35$$

La Ec. 36 calcula la parte de la longitud de la extensión cilíndrica donde su volumen es compacto y uniforme. El espesor que atraviesa esta sección de la extensión es el calibre de la platina de 5/8 de pulgada y el espesor del soporte de brida o chumacera que tiene un espesor de alrededor de 3 cm.

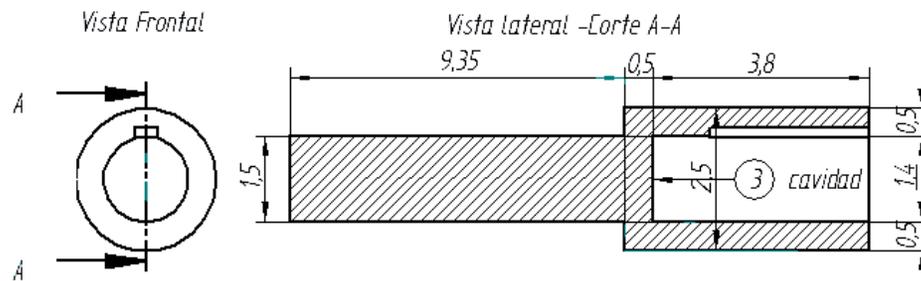


Figura 67: Extensión cilíndrica medidas complementarias -

5.3.2 Rodamientos de la extensión cilíndrica. En el desarrollo del accionamiento, el mecanismo para la extensión cilíndrica inicialmente se había diseñado con rodamientos empotrados en las platinas para sujetar la extensión cilíndrica, pero cuando se cotizó el diseño, las empresas constructoras manifestaron que la implementación era posible pero implicaba gran trabajo y lógicamente costes considerables, entonces se decidió consultar soluciones similares ya existentes que pudieran ser integradas al diseño y se encontró varios tipos de soluciones en rodamientos como:

1. Soportes de pie con rodamientos y chapa embutida, para ejes en pulgadas desde 5/8 hasta 1 3/4 de diámetro interior. El rodamiento se ilustra en la *Figura 68*. Este rodamiento ofrece dos orificios de fijación y la cavidad interna de la balinera.
2. Soportes de brida con rodamientos y fundición: 4 agujeros para ejes en milímetros desde 12 hasta 100 mm de diámetro interior: la *Figura 69* ilustra el rodamiento. Este rodamiento ofrece cuatro orificios de fijación y la cavidad interna de la balinera.
3. Soportes de brida con rodamientos y fundición: 2 agujeros para ejes en pulgadas desde 5/8 hasta 1 11/16 de diámetro interior. La *Figura 70* ilustra el rodamiento. Este rodamiento ofrece dos orificios de fijación y la cavidad interna de la balinera.

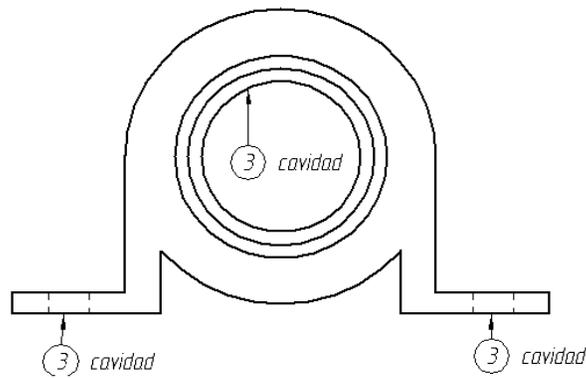


Figura 68: Soportes de pie con rodamientos y chapa

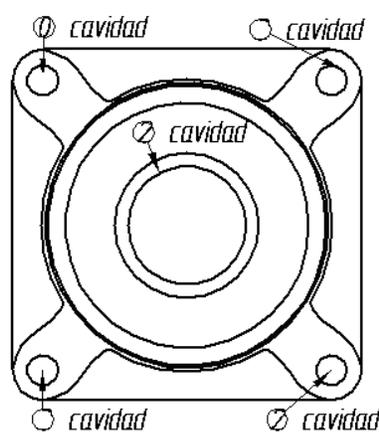


Figura 69 : Soportes de brida con rodamientos y fundición - 4 agujeros

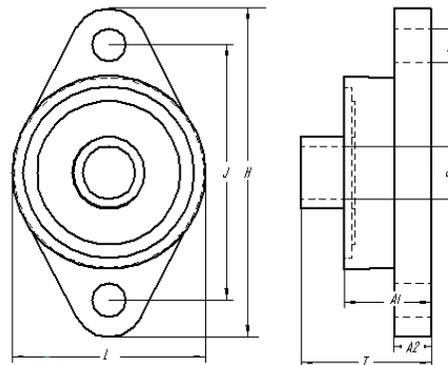


Figura 70: Soportes de brida con rodamientos y fundición -2 agujeros

De cada uno de los tipos de los rodamientos expuestos es posible encontrar algunos parámetros como: masa de la balinera, medidas y carga radial admisible que son características muy importantes a la hora de diseñar. Adicionalmente el diseñador puede escoger de entre 21 rodamientos con diámetros internos de la balinera variable en pulgadas. *Debido a la estructura de diseño requerida y espacio en el accionamiento, el tipo de rodamiento seleccionado es como el de la Figura 70.* Para dar una idea de la elección del rodamiento se presenta algunas de las especificaciones en la Tabla 10 que el diseñador debe confrontar. Los datos de la tabla corresponden a las variables señaladas en la Figura 70. Los rodamientos elegidos que se adaptaron para la extensión cilíndrica son los resaltados en la Tabla 10 , con $d = \frac{1}{2}$ Pulg. y $d = 1$ Pulg.

Tabla 10: Parámetros para seleccionar un rodamiento.

d	A1	A2	H	J	L	T	N	Masa	Referencia
Pulg.	mm.							Kg	Unid. C.
5/8	26	11	98.5	76.5	57	39.1	11.5	0.42	FYTB 5/8 FM
11/16	26	11	98.5	76.5	57	39.1	11.5	0.41	FYTB 11/16 FM
3/4 – 1/2	29.5	11	112	90	60.5	42.5	11.5	0.53	FYTB 3/4 FM
13/16	30	12	124	99	70	42.5	11.5	0.68	FYTB 13/16 FM
7/8	30	12	124	99	70	42.5	11.5	0.67	FYTB 7/8 FM
15/16	30	12	124	99	70	42.5	11.5	0.66	FYTB 15/16 FM
1	30	12	124	99	70	42.5	11.5	0.64	FYTB 1. FM
1 1/8	30	13	124	116.5	83	46.7	11.5	0.97	FYTB 1 1/8 FM
1 3/16	30	13	124	116.5	83	46.7	11.5	0.95	FYTB 1 3/16 FM

(Soportes de brida con rodamientos y fundición -2 agujeros). Unid. C.: Unidad completa

5.3.3 Rodamiento del sensor. El rodamiento del sensor es un mecanismo compuesto, cuya función es conectar y transmitir la fuerza ejercida por el motor a la celda de carga por medio de una lona. El diseño toma en cuenta el ancho de la lona igual a 5cm, los orificios para la sujeción de la celda de carga, un mecanismo que debe ser giratorio y las demás funciones que se deben cumplir.

En la Figura 71 se muestra el conjunto rodamiento ensamblado, tal y como se observa en la implementación del equipo. En esta vista no es posible observar todos los componentes y su conformación por consiguiente este se explica en más detalle en la Figura 72.

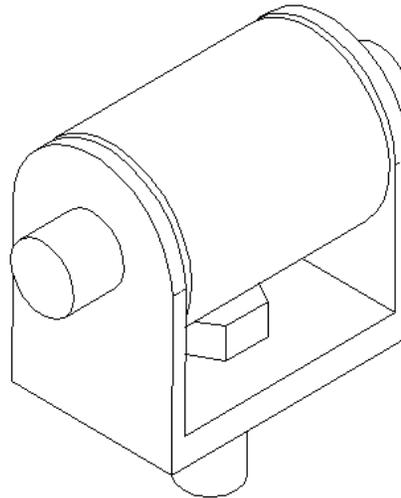


Figura 71: Vista ISO del rodamiento del sensor.

En la Figura 72 se muestra el mecanismo de rodamiento implementado para cumplir las funciones de conexión del entorno con la celda de carga, con su lista de piezas en la Figura 72-a y sus medidas en la Figura 72-b. Cada pieza cumple una función determinada; el tornillo conecta el enlace en U con la celda de carga, el enlace en U y el eje del rodamiento sirven para fijar el cilindro por donde pasará la lona; las balineras eliminan la fricción entre el cilindro y el eje durante la rotación creada por el movimiento de la lona. La lona envuelve al cilindro en un tramo semicircular permitiendo ejercer una fuerza paralela al orificio de la celda de carga.

5.3.4 La fuente de alimentación. La fuente de alimentación ilustrada con medidas y características en la Figura 73, cumple un papel importante en el funcionamiento del sistema ya que esta suministra la potencia eléctrica para el funcionamiento de las tarjetas que manejan la lógica del sistema y polariza el circuito del amplificador de la señal de la celda de carga.

Debido a que la fuente es adquirida comercialmente, por su tamaño y conectores ya determinados debe ser situada estratégicamente para optimizar la distribución espacial de los componentes y para que el cable de poder que la alimenta quede situado en la parte posterior. Además, también cumple el papel fundamental de ventilación, por lo cual su caja contenedora ha sido modificada, con orificios que permiten pasar el flujo de aire a las tarjetas de circuito impreso.

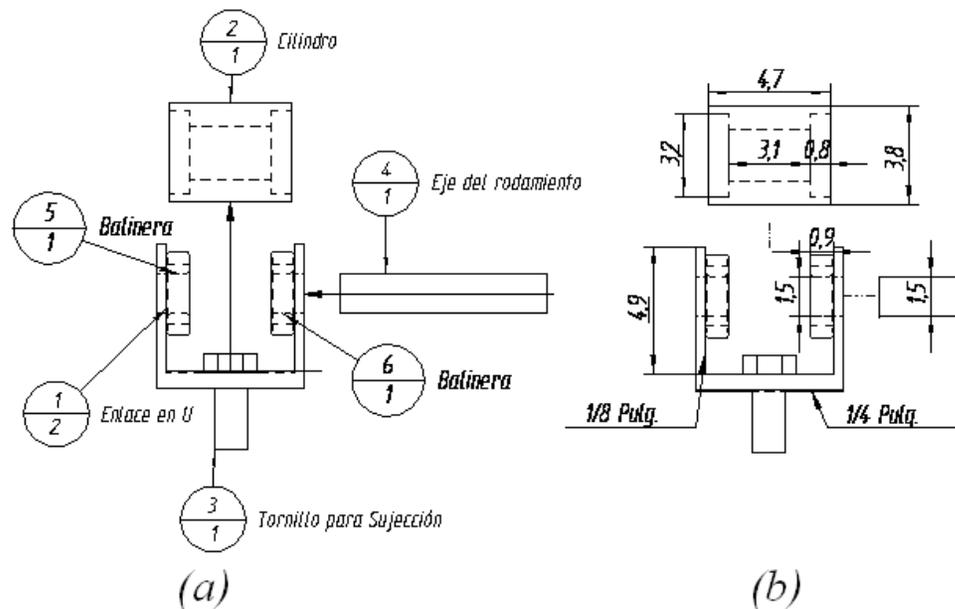


Figura 72: Rodamiento del sensor-Medidas y lista de piezas.

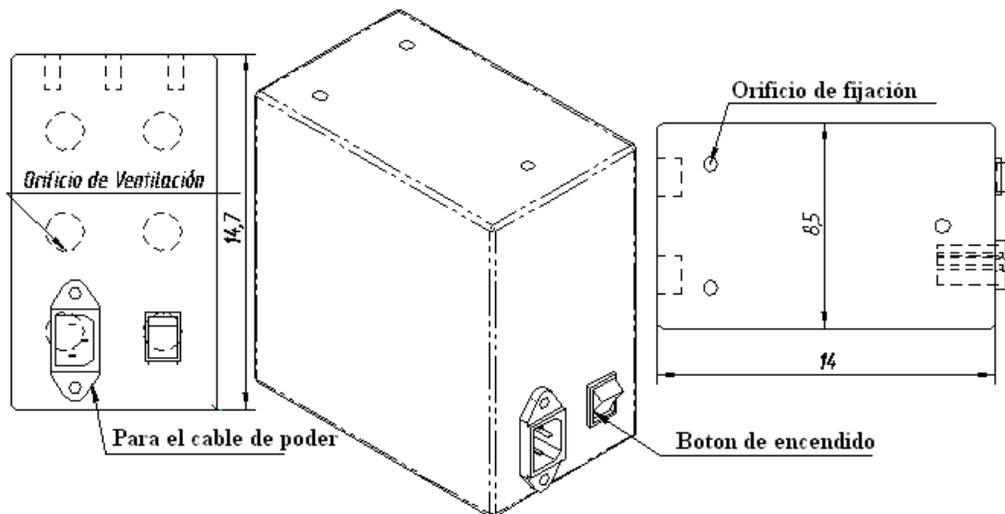


Figura 73: Fuente de alimentación comercial.

5.4 ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ESPACIOS.

Una vez se modelaron los componentes comerciales, se estudió la distribución de los componentes para la funcionalidad, estética y optimización de la distribución de espacios con el objeto de lograr el mejor diseño con el menor número de operaciones (material, cortes, perforaciones, roscas, etc.), tiempo de trabajo, disminución de costos y mejoramiento de características tales como: tamaño, peso

y ergonomía. En ese orden de ideas el siguiente paso fue sobreponer los elementos en un entorno aproximado, que para este caso es una estructura capaz de soportar un tensión equivalente a 100 Kg, con poleas para guiar la lona que transmitirá la fuerza a través de cilindros, ejes y otros aditamentos que se irán explicando a través de este capítulo.

Para asegurar el mejor diseño se simularon diferentes modelos y distribuciones. Por cada distribución y ubicación de componentes la estructura mecánica varia, ocasionando también cambios en su estructura, cantidad de material, tamaño, etc. Por eso se presentan a través de Solid Edge algunos modelos que se probaron; sin embargo por los resultados obtenidos en la simulación se descartaron, no obstante estos sirvieron para converger al diseño final.

La Figura 74 muestra una distribución de componentes que por estética y tamaño fue descartada. La Figura 74 –a muestra la vista ISO de esta distribución; en ella se muestra la fuente de alimentación sobre puesta al soporte mecánico que integra el motor, la celda y los demás componentes. En la Figura 74 –b se muestra la vista frontal; en ella se observa los espacios inoficiosos que conlleva esta distribución y la hace un desacierto.

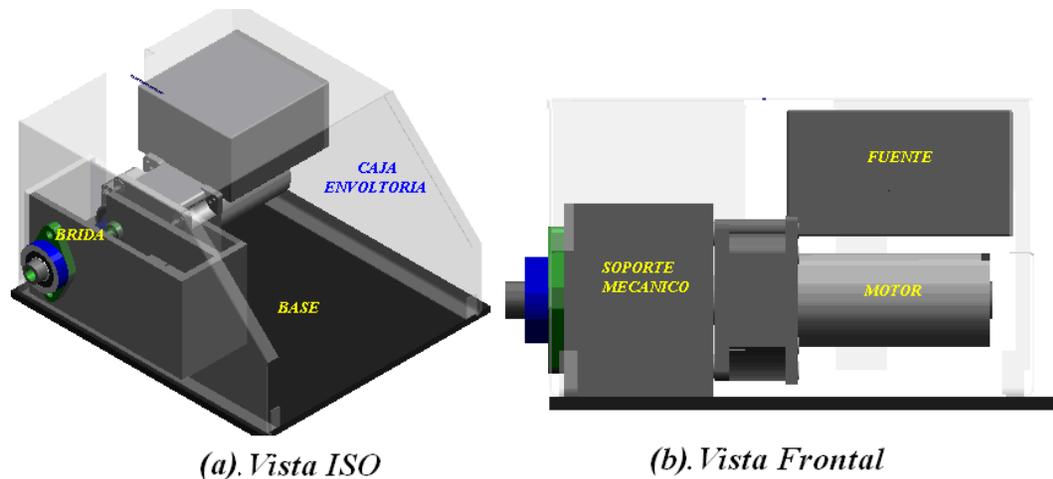


Figura 74: Alternativa 1 de la arquitectura sistema mecánico.

La Figura 75 muestra otra prueba de distribución que se hizo de los elementos, sin embargo esta tuvo los mismos inconvenientes que la distribución anteriormente descrita. En esta distribución se probó una estructura vertical, que conllevaba a un aumento exorbitante en la altura del equipo, motivos por los cuales también fue un desacierto de diseño.

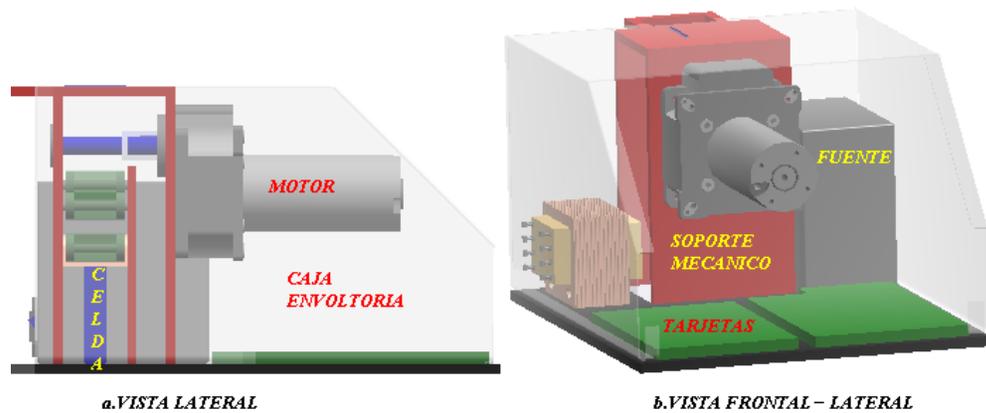


Figura 75: Alternativa 2 de la arquitectura sistema mecánico.

Finalmente una vez realizadas estas pruebas se encontró el mejor diseño que optimiza el producto en cuanto a todas sus características. Con la distribución de elementos implementada finalmente se se mejoran las fallas de los demás diseños, haciendo un producto robusto en diseño y funcionalidad.

La distribución final determino el tamaño del soporte mecánico del sistema y de los demás componentes. Esta distribución fue la implementada y se expone en la Figura 76 y Figura 77. Se implementa esta distribución ya que se obtiene un buen aprovechamiento de los espacios, menor peso y tamaño y ofrece una buena accesibilidad a los circuitos eléctricos del sistema.

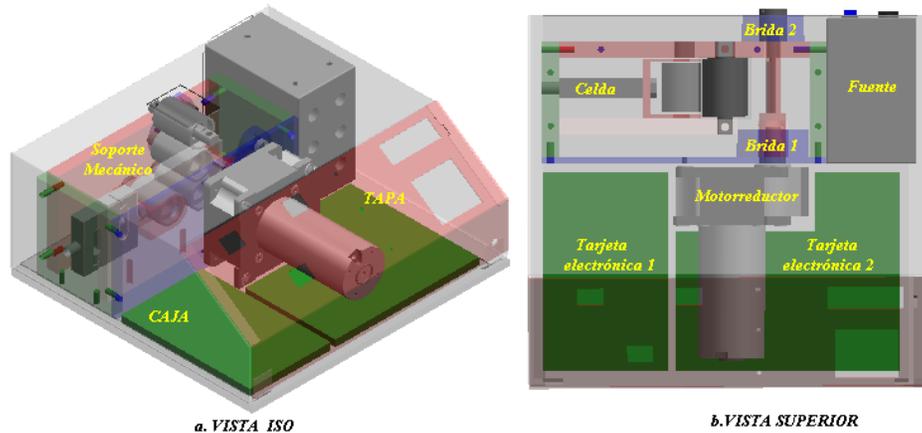


Figura 76: Arquitectura del sistema implementada

La Figura 76 presenta vistas ISO y superior. En ellas se observa el aprovechamiento de espacios casi en un 100 % y el conjunto de partes comerciales ubicadas según su tamaño en la mejor forma. Se muestra el soporte mecánico conectando una serie de rodamientos cuya función es transmitir la

fuerza del motor hasta la carga, esta situación se describe con más detalle en la Figura 77-b.

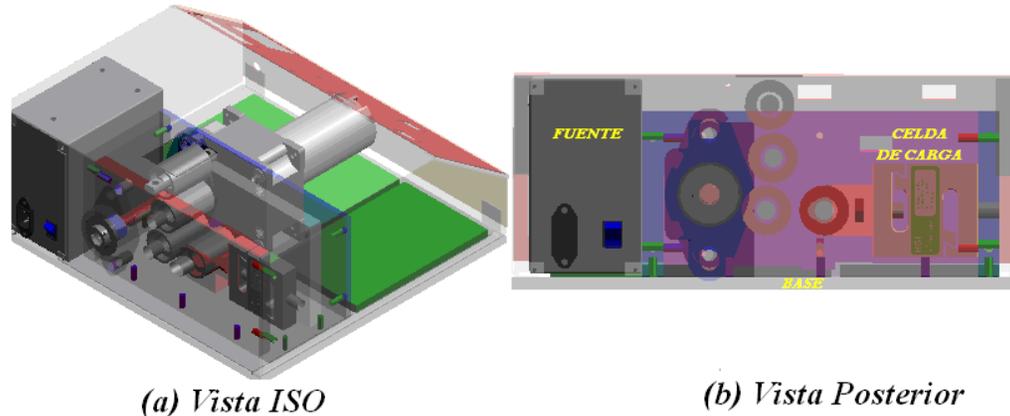


Figura 77: Arquitectura del sistema implementada.

5.5 MODELACIÓN DE LAS PARTES FABRICADAS.

Una vez se obtuvo la mejor distribución de componentes, el siguiente paso fue perfeccionar los detalles del soporte mecánico, la transmisión y conexión entre el motor, la celda de carga y la salida hacia el exterior. Entonces se diseñó, la estructura compuesta por 6 platinas unidas a través de tornillo Bristol de cabeza redonda y agujeros avellanados para obtener estética y buen terminado. Para transmitir la fuerza sobre la estructura se montaron una serie de rodamientos similares a los que mostró en la Figura 72; cada uno de ellos está compuesto por un cilindro con 2 camisas y un agujero que lo traspasa, 2 balineras, y un eje para la rotación de todo el rodamiento. La Figura 78 muestra la estructura mecánica, en ella se ilustra la ubicación espacial del motor, la celda de carga y los demás componentes.

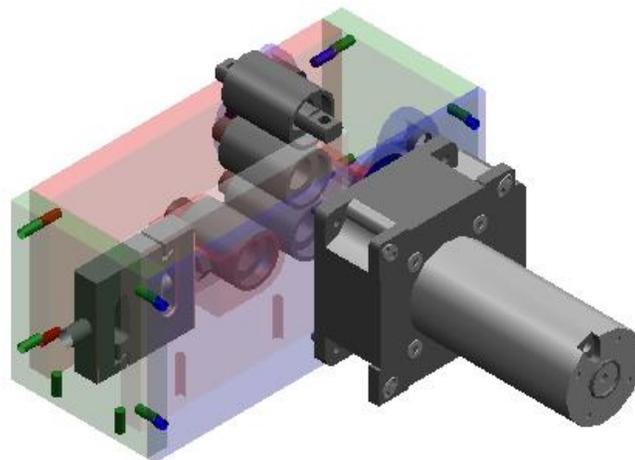


Figura 78: Estructura del sistema de tracción –Vista ISO.

En la Figura 79 se muestra la vista superior de la estructura principal que soporta los componentes. Esta Vista no incluye la platina base. En ella se observa claramente como se han fijado todos los elementos.

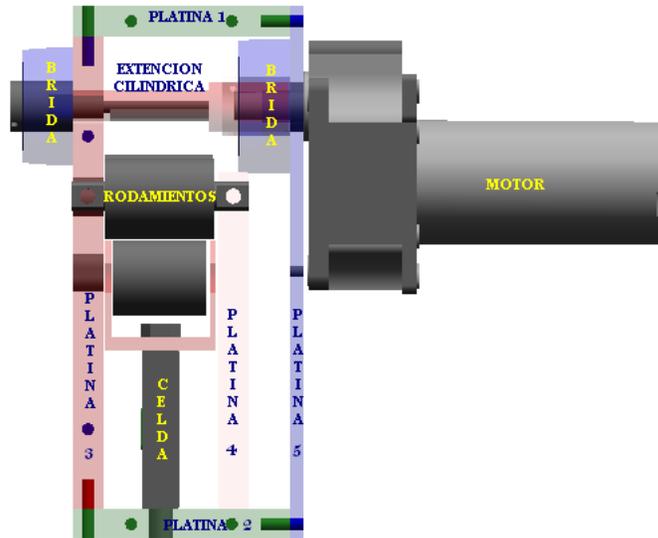


Figura 79: Estructura del sistema de tracción –Vista superior.

Con respecto al funcionamiento sobre la extensión cilíndrica, se enrolla la lona (pintada en amarillo-Figura 80) y hace un recorrido por los rodamientos hasta rodear el mecanismo expuesto en la Figura 72 para salir por la parte superior de la estructura. La Figura 80 ilustra este sistema. Como se muestra, la fuerza ejercida por el motor hacia el exterior (paciente), se transmite como una fuerza f al centro del rodamiento de la celda de carga. El rodamiento de la celda de carga puede desplazarse en dirección de la fuerza ejercida para que pueda deformarse. Los rodamientos en este caso actúan como poleas que solo cambian a dirección de la fuerza.

Para que la celda experimentara la fuerza con un alto grado de exactitud, esta debía ejercerse centrada y perpendicularmente al plano de sus orificios. Para ello se diseñó el sistema de forma que la lona forme tangentes de entrada y salida alrededor del rodamiento de la celda de carga, así todas las componentes de fuerza ejercida actúan en la dirección adecuada para deformar la celda en la trayectoria precisa.

Finalmente se mecanizaron las piezas o cubiertas exteriores que son vistas por el usuario y que conforman y sostienen la interfaz del equipo. Estas son desarrolladas en lámina (Chapa) de calibre 20. Su estructura fue dividida en dos piezas que como se muestra en la Figura 81. La chapa base pintada en negro es fijada sobre

la platina base del soporte mecánico, mientras la chapa superior en azul es fijada sobre pieza principal de la caja (pintada en negro)

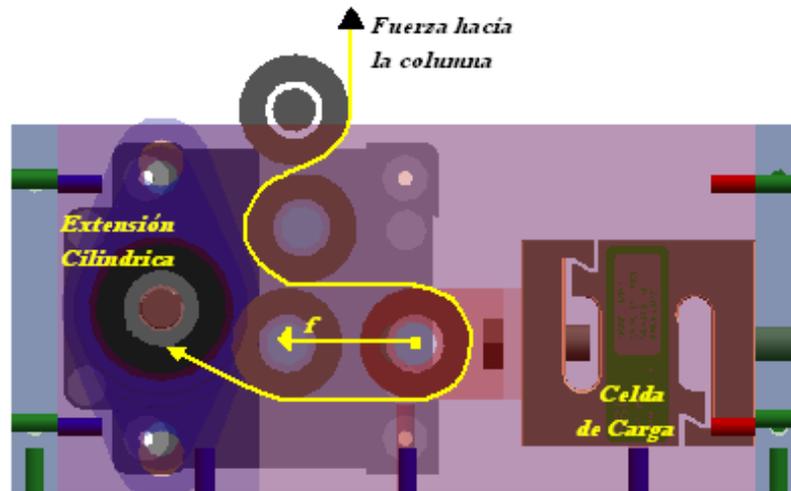


Figura 80: Interacción entre Motor, celda de carga y rodamientos.

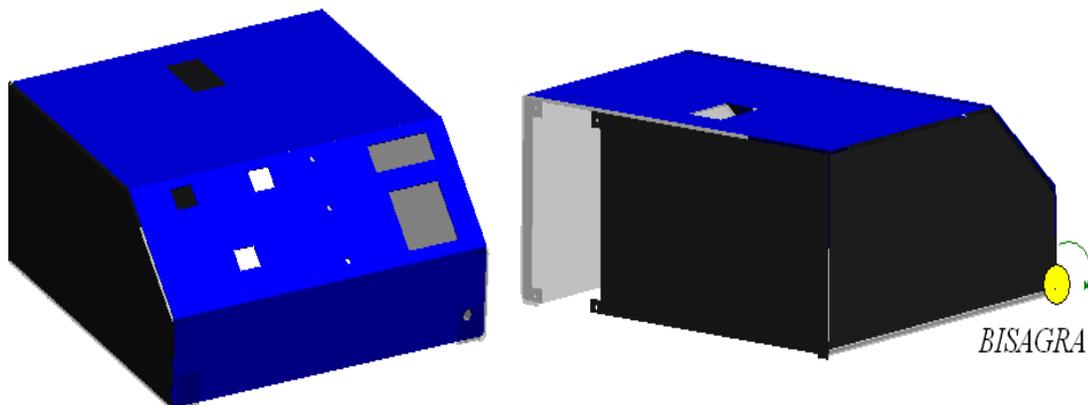


Figura 81: Caja envoltoria-Vista ISO.

Algunos planos de las platinas y las chapas son consignados en el anexo D de este documento. Los planos totales son consignados en el CD de archivos de este proyecto.

5.6. DETALLES DE CONSTRUCCION.

En esta sección se describe el proceso de construcción y detalles para comprender claramente el proceso de implementación del accionamiento.

5.6.1 DETALLES DE LA ESTRUCTURA MECANIZADA. Si bien el mecanizado de piezas del equipo fue realizado por operarios, el éxito en la elaboración de

estas fue debido a un dispendioso diseño y simulación elaborado en el software de soporte CAD. Para iniciar este trabajo se desarrolló un trabajo específico directamente relacionado con el proceso de mecanizado. Se obtuvieron los materiales requeridos con base a las características consignadas en el capítulo 5, en almacenes de materia prima de la zona urbana. Parte de ellos, para reducir costos, se obtuvieron de segunda mano, por ello fue necesario elaborar una serie de adaptaciones y procedimientos para adecuar la materia prima a las condiciones del mecanismo expuesto.

Los materiales incluidos son básicamente hierro y acero de espesor de 1/4 y 5/8 de pulg. para las platinas del soporte, y lamina calibre 20 para la elaboración de la chapa.

5.6.1.1 Soporte mecánico. Para iniciar el trabajo con base a las simulaciones fue necesario procesos de corte en medidas aproximadas a las requeridas y posteriormente se desarrolló un proceso de rectificado. Existen varias alternativas para llevar a cabo estas operaciones; por ejemplo los cortes en platinas son dispendiosos y por ello a menudo es usado oxicorte, un procedimiento que facilita enormemente los trabajos de corte en material de gran espesor. Este necesita un gran trabajo adicional de pulido y llenado, pues en las secciones donde se efectúan los cortes quedan protuberancias residuales considerables que imprimen inexactitudes en la figura que se requiere. Se exploró este procedimiento pero se descartó debido a lo anteriormente descrito. En su defecto fue necesario elaborar cortes con herramientas primitivas que requieren de gran esfuerzo por parte del operario con resultados no aceptables que fueron corregidos en la rectificación.

El proceso de rectificado de platinas es posible mediante torno o cepillo, el primero es dispendioso pero más económico, por ello se desarrolló esta operación por medio de este procedimiento.

Una vez se tienen las platinas rectificadas (Ángulos de 90 °), estas medidas fueron realimentadas al software de diseño, para la elaboración de las plantillas a escala 1:1. Una vez se tiene esta plantilla se corroboran las medidas de las plantillas con la materia prima, se capturan los centro puntos, bordes y formas en el material y se procede con la herramienta precisa.

5.6.1.2 La extensión y los rodamientos. Los materiales usados son hierro y acero 10:45 para los rodamientos. Estas piezas fueron elaboradas en torno, las recamaras son 1 mm menos profundas que el espesor de las balineras, pues así se facilita el trabajo del rodamiento debido a que las balineras pueden sobreponerse por un lado específico para evitar la fricción de uno de sus anillos.

Para tener un grado de fiabilidad en el rodamiento que se incluiría, se encuestó a varios operarios para que recomendaran, con base a su experiencia, el tamaño y

diámetro de la balinera, pues algunos de estos rodamientos no incluyen el límite máximo de la carga axial admisible y el trabajo que desarrollan en este mecanismo es exigente.

Generalmente en el mercado es posible encontrar balineras de distintas calidades. Una balinera difiere de otra específicamente en la característica de velocidad, es decir la característica calidad está asociada esencialmente a su velocidad. Por eso en este trabajo se incluyeron balineras de mediana calidad, debido a que los rodamientos se exponen a bajas velocidades y altas cargas axiales.

5.7 PRESENTACION DEL ACCIONAMIENTO ELECTRICO.

En las figuras siguientes se presenta el accionamiento implementado, mostrando las vistas exteriores. El mecanismo ha sido acoplado temporalmente a una estructura mecánica similar a la que finalmente se usará. En la Figura 82 se muestra la vista anterior. En la Figura 83 se ilustra el mecanismo de sujeción, el cual debe ser adicionado y acondicionado a la camilla donde funcionará el accionamiento. En estas figuras se muestra la interfaz de usuario que se debe operar para lograr las operaciones deseadas, así como otros detalles importantes de conexión y los puertos de comunicación que son indicados en la Figura 84 y documentados en el manual de usuario del equipo.

En la Figura 82 se muestra la lona o correa que conecta el accionamiento con el paciente.



Figura 82: Accionamiento eléctrico implementado – Vista ISO- anterior



Figura 83: Accionamiento eléctrico implementado vista ISO inferior.



Figura 84: Accionamiento eléctrico implementado- vista ISO superior.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones finales y las recomendaciones generales, producto del desarrollo del presente trabajo de grado.

6.2 CONCLUSIONES.

6.2.1 Conclusiones de los resultados obtenidos:

- Se obtuvo un accionamiento eléctrico para una máquina de tracción lumbar y cervical.
- La teoría de accionamientos eléctricos se confirma mediante la implementación del equipo.
- Haciendo uso del controlador PI y algunas reglas obtenidas en base a la naturaleza de la planta se obtuvo una óptima respuesta del sistema.
- La instrumentación con la que cuenta el equipo es muy robusta y con las pruebas desarrolladas se valida el diseño documentado.
- El uso de herramientas de simulación favoreció la comprensión y el diseño del sistema de control implementado.
- Mediante las simulaciones se pueden conocer comportamientos imposibles de experimentar en plantas reales.
- La programación mediante MPLAB assembler optimiza la programación para una aplicación específica.
- Las herramientas de compilación de ASSEMBLER minimizan el trabajo de programación, sin embargo estas llevan al programador a desconocer la operación del hardware embebido dentro del microcontrolador.
- Las fuentes de poder comerciales para aplicaciones de este tipo son un trabajo ya desarrollado en la actualidad, por tanto es mejor incluirlas que realizar los diseños respectivos.
- Es posible realizar fabricación de piezas con buena exactitud con la asistencia de herramientas CAD.
- La evolución de los sistemas CAD hacia la realidad virtual, nos permiten la evaluación de los productos de una manera más práctica y directa.

6.2.2 Conclusiones generales del proyecto:

- La sinergia entre los entes de la universidad es la manera para materializar proyectos.

- Se comprobó que las áreas enfocadas al desarrollo de productos son asignaturas importantes a la hora de afrontar desarrollo de proyectos, así como las asignaturas que orientan la técnica de la automática como tal.
- Se mostró que Solid Edge es una herramienta potente de diseño, pues sin esta sería muy difícil llevar a feliz término este tipo de proyectos.
- Los retardos del proyecto fueron originados por las dificultades en el proceso de negociación de los instrumentos y por falta de compromiso en los departamentos de compras que efectuaron la negociación.
- Existe falta de compromiso de los funcionarios de los departamentos de compras, pues con el proyecto se demuestra que estos no realizan los trámites pertinentes para que los costos de los insumos sean mínimos.
- La Vicerrectoría de investigaciones es un ente funcional y cumplidor con la labor encomendada, impulsador de proyectos y abierto a evaluar propuestas investigativas.
- En los laboratorios de la Universidad del Cauca es imprescindible una herramienta desarrollo de microcontroladores.
- Por la experiencia del autor mismo, se concluye que hace falta gestión de presupuestos para la investigación por parte de la FIET. Si el autor en este caso realizo acciones pertinentes y obtuvo el presupuesto requerido, los departamentos pueden formular investigaciones y obtener también respaldo económico para sus proyectos.
- En el Cauca existe mano de obra confiable, capaz y experimentada para trabajar con precisión.

6.3 RECOMENDACIONES

Para ampliar los resultados obtenidos en un futuro, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Implementar otras formas de onda matemáticas para otro tipo de tratamientos, pues estos no son aplicados ni experimentados en la época actual.
- Implementar un sistema de administración de datos para facilitar al investigador de las ciencias de la salud en la incursión de tratamientos terapéuticos.
- Realimentar las opiniones de los operadores o profesionales de la salud al rediseño de la máquina con el objeto de evolucionar el servicio hacia el cliente como tal.

6.4 BIBLIOGRAFIA

1. **NED** Mohan, electric drives, an integrative approach, 2001 edition. Pag (1-1 a 1-4).
2. **NED** Mohan, electric drives, an integrative approach, 2001 edition. Pag (4-1 a 4-7).
3. **WERNER** Leonhard, Control de maquinas eléctricas, 4 edición. Sección 7.2.
4. **OGATA**, Sistemas de control de tiempo discreto, 3 edición. p113-117 y p215.
5. **BOYLESTAD y NESHELSKY**, Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, octava edición p149-154 , 164-166 y 675- 686
6. **SMITH**, Carlos A. y **CORRIPIO**, Armando B. Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica. NORIEGA Editores. p. 265 -271.
7. **DUANE** Hanselman y **BRUCE** Littlefield, Matlab Guia de estudiante. Prantice Hall V4. P10, 254, 701,801.
8. **DICIONARIO DE MEDICINA OCEANO MOSBY**, Editorial Océano 1996, 4 Edición.
9. **MANUAL CROUZET**- Version en español- more than standard.
10. **ECG**, Master replacement Guide.
11. **ICONTEC**. Guía para numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos. Norma Técnica Colombiana 1486 (Quinta actualización). Bogotá, octubre de 1994.
12. **CARRERA DE ARQUITECTURA UNET**, técnicas de simulación para el diseño [http:// www.unet.edu.ve/~frsilva/Cada.htm](http://www.unet.edu.ve/~frsilva/Cada.htm).