



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PRUEBAS TRIBOLÓGICAS BASADA EN LA TÉCNICA DE CUATRO BOLAS DE ACERO LUBRICADAS

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA**

P R E S E N T A:

Ing. Ernesto David García Bustos.

D I R E C T O R:

Dr. Bernardino Benito Salmerón Quiroz.

Dr. Manuel Vite Torres.



México, D.F. Diciembre 2009.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:00 horas del día 02 del mes de Diciembre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME - U.A. para examinar la tesis de titulada:

Diseño y desarrollo del sistema de control y automatización de una máquina de pruebas tribológicas basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas

Presentada por el alumno:

García	Bustos	Ernesto David
Apellido paterno	materno	nombre(s)
Con registro:		
B	0	7 1 4 2 8

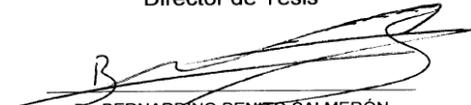
aspirante al grado de:

Maestro en Ingeniería de Manufactura

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de Tesis


 Dr. BERNARDINO BENITO SALMERÓN QUIRÓZ

Director de Tesis


 Dr. MANUEL VITE TORRES

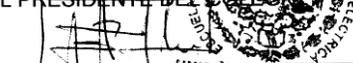

 Dr. ORLANDO SUSARREY HUERTA
 Presidente


 Dr. JOSÉ MARTÍNEZ TRINIDAD
 Secretario


 Dr. SALVADOR ANTONIO RODRÍGUEZ PAREDES
 3er Vocal


 M. EN C. RAÚL RIVERA BLAS
 Suplente

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


 UNIDAD PROFESIONAL AZCAPOTZALCO
 DR. JAIME PACHEGO MARTÍNEZ
 SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

Handwritten mark

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 05 del mes de Diciembre del año 2009, que suscribe García Bustos Ernesto David alumno del programa de Maestría en Ingeniería de Manufactura con número de registro B071428, adscrito a la Sección de Estudios Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Azcapotzalco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Bernardino Beni Salmerón Quiroz y Dr. Manuel Vite Torres y cede los derechos del trabajo intitulado “DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PRUEBAS TRIBOLÓGICAS BASADA EN LA TÉCNICA DE CUATRO BOLAS DE ACERO LUBRICADAS” al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: edgb007@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ing. Ernesto David García Bustos

Dedicatoria

Hay personas en la vida que te guían por los diferentes caminos, te brindan su apoyo tanto en los buenos momentos, como en tiempos de tristeza y zozobra, haciéndose presente con una sonrisa o con palabras de ánimo, alentándote a perseguir los objetivos y no descansar hasta lograrlos.

Le dedicó a mi mamá no solo este trabajo, sino todos los logros que he obtenido y obtenga en la vida.

“Gracias por estar siempre a mi lado”

Agradecimientos

Este proyecto refleja el trabajo de más de dos años, para el cual el apoyo brindado tanto por las personas que me han ofrecido su amistad y guía, como por las instituciones que confiaron en mis capacidades para llevar a buen puerto el proyecto les doy las gracias.

Al Instituto Politécnico Nacional, principalmente a la ESIME Azcapotzalco, le agradezco al haberme dado la oportunidad de ser parte de uno de sus programas de postgrado y así cumplir con una de mis metas.

Al CONACYT, le agradezco la confianza puesta en mí, ya que siendo el organismo rector del desarrollo tecnológico en México, me apoyo de forma económica en los últimos meses de mis estudios.

Al conjunto de profesores que forman parte del programa de estudios de la Maestría en Ingeniería de Manufactura, principalmente a los Doctores Bernardino Benito Salmerón y al Doctor Manuel Vite Torres, los cuales, por su experiencia y conocimientos aportaron a mi trabajo no solo como estudiante sino como profesional, una visión más completa de las habilidades y conocimientos necesarios para el desarrollo de cualquier proyecto que se presente en mi vida.

A los compañeros que por su variedad de pensamientos, aportaron durante nuestro ciclo de estudios diversas ideas, formas de pensar y opiniones que enriquecieron las lecciones presentadas en las aulas, les agradezco. Con especial aprecio al compañero y amigo, Marco Antonio Figueroa Guadarrama, el cual no solo mostró la valía de un compañero de estudios, sino que por su apoyo, consejo y amistad, fue parte fundamental de mi desarrollo en los últimos años.

A mi familia le doy las gracias porque nunca dejaron de apoyarme, tanto en los buenos como en los malos momentos, brindándome siempre la tranquilidad de un hogar cálido y apacible donde el problema de uno, se soluciona en equipo.

A la mamá y hermana de Marco Antonio, les agradezco que sin ser parte de su familia, me brindaron su confianza y apoyo, haciéndome sentir como un miembro más de ellos.

Y finalmente a todas esas personas que me ayudaron ya sea profesional, intelectual o laboralmente, les doy las gracias por haber sido parte de este camino que llega a su fin.

García Bustos Ernesto David

RESUMEN

El proyecto presentado en esta tesis, muestra el diseño e implementación de un sistema de control y automatización a una máquina de ensayos tribológicos basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas.

Partiendo desde las normas internacionales, las cuales rigen los ensayos tribológicos, considerando tanto el material lubricante, así como los parámetros que cada una de las normas requieren, principalmente en las variables que conforman el ensayo como son temperatura del material lubricante, velocidad de giro, tiempo de prueba y carga aplicada. Se realizó un estudio utilizando diversas herramientas como por ejemplo, la definición de tareas por medio del GRAFCET, así como la revisión del comportamiento y composición de cada uno de los subsistemas que realizan las diversas tareas del mecanismo por medio del estudio de los diferentes Sistemas de Transferencia de Energía.

La definición de tareas y la de subsistemas, fueron la base para el diseño y construcción de la programación de operaciones. Considerando el manejo de datos, así como el comportamiento de las variables principales, se formó una interfaz capaz de satisfacer las necesidades tanto del usuario como del sistema, ejecutando las tareas de cada uno de los sistemas de forma correcta, al igual que una interfaz gráfica, que proporciona tanto una visualización completa de cada una de las tareas, como una definición clara del comportamiento de las variables en cada una de las etapas de la prueba.

El proyecto se concluyó con la construcción y puesta en marcha del equipo, el cual se encuentra en el departamento de tribología de la ESIME Zacatenco.

ABSTRACT

The project presented in this thesis, shows the design and implementation of an automation control system and a tribological test machine based on the technique of four steel balls lubricated.

Starting from international standards, which govern the tribological tests, considering both the lubricating material, and the parameters that each of the standards required, especially in those variables such as temperature testing of lubricating material, speed, test time and applied load. A study was conducted using various tools such as task definition through GRAFCET well as reviewing the conduct and composition of each of the subsystems that perform the various tasks of the mechanism by examining the different Systems Energy Transfer.

The definition of tasks and subsystems, were the basis for the design and construction of the tasks programming.

Considering the data management and the behavior of key variables, formed an interface that could meet the needs of the user and the system, as a graphical interface, which provides a comprehensive view of each of the tasks, as a clear definition of the behavior of the variables in each stage of the test.

The project was completed with the construction and commissioning of equipment, which is in the tribology department of ESIME Zacatenco.

CONTENIDO

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. General	2
1.3.2. Objetivos particulares	2
1.4. Justificación	3
1.5. Introducción	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Tribología	8
2.1.1. Lubricación	10
2.1.2. Pruebas tribológicas	13
2.2. Control y automatización	15
2.2.1. El control en la antigüedad	15
2.2.2. La revolución industrial	17
2.2.3. Sistema de transmisión de energía	18
2.3. Usabilidad	20
2.4. Máquinas tribológicas	20
2.4.1. Investigaciones actuales	25
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	28
3.1. Tribología	28
3.1.1. Contacto mecánico	30
3.1.1.1. Contacto entre superficies	31
3.1.1.2. Deformación elástica	32
3.1.1.3. Deformación plástica	33
3.1.2. Fricción	34
	viii

3.1.2.1.	Coeficiente de fricción	35
3.1.3.	Desgaste	35
3.1.3.1.	Proceso de desgaste	36
3.1.3.2.	Tipos de desgaste	37
3.1.4.	Lubricación	38
3.1.4.1.	Lubricantes líquidos	38
3.1.4.2.	Lubricantes compuestos	40
3.1.4.3.	Lubricantes semisólidos	41
3.1.4.4.	Regímenes de lubricación	42
3.2.	Control	45
3.2.1.	Señales de un sistema de control	46
3.2.2.	Sistema de control	47
3.2.2.1.	Conceptos matemáticos de control	48
3.2.2.2.	Diagrama de bloques	50
3.2.3.	Modelado y simulación de sistemas	51
3.2.3.1.	Modelado matemático de sistemas	51
3.2.4.	Automatización	62
3.2.4.1.	Sistemas automáticos	63
3.2.4.2.	Automatismos	64
3.2.4.3.	Diseño de un sistema secuencial	64
3.2.5.	Lenguajes de programación	67
3.2.5.1.	Álgebra Booleana	67
3.2.5.2.	Lista de instrucciones (Instruction List IL)	68
3.2.5.3.	Estructura textual (ST)	70
3.2.5.4.	Diagrama de Bloques Funcionales (FBD)	71
3.2.5.5.	Diagrama de contactos (LD)	73
3.2.6.	Sistema Hombre-Máquina	75
3.2.6.1.	Ergonomía de Aplicaciones Interactivas	76
3.2.7.	Actuadores neumáticos.	79
3.2.8.	Adquisición de señales y monitoreo de estado.	83
3.2.8.1.	Lógica difusa	85

3.2.8.2.	Redes neuronales	86
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE TAREAS Y DISEÑO DE SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA		88
4.1	Análisis de tarea	89
4.1.1	Desglose de tareas	89
4.1.1.1	Pruebas de no extrema presión	89
4.1.1.2	Prueba de extrema presión	91
4.1.1.3	Prueba no normalizada	92
4.1.2	Proceso de prueba	93
4.1.2.1	Desarrollo del sistema	94
4.1.3	Definición de sistemas programables	96
4.2	Diseño de Sistemas de Transferencia de Energía	104
4.2.1	Sistema de Transferencia de Energía: Aplicación de carga	104
4.2.1.1	Subsistema neumático	105
4.2.1.2	Diagrama de conexiones neumáticas	110
4.2.2	Sistema de Transferencia de Energía: Térmico	112
4.2.2.1	Subsistema termoeléctrico	113
4.2.2.2	Diagrama de conexiones del subsistema térmico	115
4.2.3	Sistema de Transferencia de Energía: Giro	116
4.2.3.1	Subsistema de Giro	117
4.2.3.2	Diagrama de conexiones del motor	118
CAPÍTULO 5. MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA.		120
5.1	Modelado matemático de los sistemas	120
5.1.1	Definición matemática del sistema neumático	120
5.1.1.1	Modelo matemático del Sistema de Transferencia de Energía: neumático	124
5.1.2	Definición matemática del sistema térmico	125
5.1.2.1	Modelo matemático del Sistema de Transferencia de Energía: Térmico	126
5.1.3	Definición matemática del sistema de par	129
5.2	Sistema de control	131
5.2.1	Sub-sistema neumático	131

5.2.2	Sub-Sistema térmico	133
5.2.3	Sub-sistema de par	134
5.2.4	Sub-sistema de control de velocidad	135
5.3	Sistema de monitoreo y registro.	136
5.3.1	Elementos de adquisición de datos	136
5.3.2	Registro y monitoreo	138
5.4	Programación de tareas	141
5.4.1	Flujo de mando	141
5.4.2	Variables de programación	143
5.4.3	Automatización de tareas	144
5.4.4	Construcción de programa.	145
5.4.5	Muestreo de monitoreo y generación de reporte	147
5.5	Interfaz Hombre-Máquina	148
5.5.1	Análisis de operaciones	148
5.5.2	Modelado del usuario	149
5.5.3	Estilo de la interfaz	151
5.6	Elementos integrantes de la máquina de ensayos tribológicos	152
5.6.1	Subsistema neumático	152
5.6.2	Subsistema térmico	153
5.6.3	Sistema de giro	153
5.6.4	Prototipo	154
5.7	Pruebas de arranque	156
5.7.1	Pruebas de estado pasivo	156
5.7.2	Pruebas de estado activo	158
	CONCLUSIONES	162
	Perspectivas	162
	Trabajos futuros	163
	Publicaciones y reconocimientos	164
	Bibliografía	175
	Anexo.	182
	Anexo A	182
	Anexo B	187

LISTA DE FIGURAS.

Fig. 1	Convergencia de ideas en el proceso de fabricación de un producto.....	8
Fig. 2	Reloj de Agua de Ktesibios, reconstruido por H. Diels	16
Fig. 3	Gallo de Estrasburgo	17
Fig. 4	Elementos de un sistema de transmisión de energía	18
Fig. 5	Componentes de un sistema de transmisión de energía	19
Fig. 6	Equipo diseñado por Leonardo Da Vinci para medir la fuerza de fricción.....	21
Fig. 7	Configuraciones de prueba. a) Contacto lineal b) Contacto puntual c) Contacto lineal d) Contacto superficial circular e) Contacto puntual.....	21
Fig. 8	Ejemplo de sistema de sujeción	24
Fig. 9	Aparato para pruebas a lubricantes, Patente 2,370,606 1945, a) Dibujo1, b) Dibujo2	24
Fig. 10	Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Block-on-ring	26
Fig. 11	Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de cuatro bolas en vacío.....	26
Fig. 12	Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Pin- on - Disk al vacío	27
Fig. 13	Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Pin-on-Disk.....	27
Fig. 14	Ciencias que apoyan a la tribología	28
Fig. 15	Objetivos prácticos de la tribología.....	29
Fig. 16	Tribosistema.....	29
Fig. 17	Área real de contacto.....	30
Fig. 18	Diagrama esfuerzo deformación	31
Fig. 19	Deformación elástica presente en el contacto de una esfera de radio r , presionada contra una superficie plana. Bajo una carga w	32
Fig. 20	Distribución del esfuerzo normal de una esfera de material elástico contra una superficie plana.....	32
Fig. 21	Ensayo Brinell, una esfera de acero es presionada contra una superficie plana, para posterior mente medir el diámetro de la marca	33
Fig. 22	Ensayo Vickers, en este ensayo se presiona un indentador de forma cuadrada, piramidal con punta de diamante a una superficie plana y las diagonales generadas son medidas.....	33
Fig. 23	Fricción deslizante y Fricción rodante	34
Fig. 24	Mecanismos microscópicos de fricción. a) Adhesión; b) Rayado; c) Presencia de óxidos; d) Terceros cuerpos.....	35
Fig. 25	Desgaste W en función del tiempo de operación	37
Fig. 26	Ley de viscosidad de Newton.....	39
Fig. 27	Lubricación por fluido.....	43

Fig. 28 Curvas de Stribeck	43
Fig. 29 Película lubricante (22)	44
Fig. 30 Lubricación límite o de frontera.....	45
Fig. 31 Sistema de control de lazo cerrado.....	45
Fig. 32 Robot que utiliza reconocimiento de imagen. Ejemplo sistema de lazo cerrado	48
Fig. 33 Bloque funcional	50
Fig. 34 Punto suma	50
Fig. 35 Diagrama de bloques de lazo cerrado	51
Fig. 36 Sistema de resorte-masa-amortiguador montado en un carro	51
Fig. 37 Sistema mecánico rotacional.....	53
Fig. 38 Circuito eléctrico.....	54
Fig. 39 Sistema mecánico y eléctrico análogo (Fuerza - Voltaje).....	55
Fig. 40 Sistema mecánico y sistema eléctrico (fuerza - corriente).....	56
Fig. 41 Circuito eléctrico de un motor cd con control de armadura.....	57
Fig. 42 Diagrama de bloques para un motor cd con control de armadura.....	57
Fig. 43 Función de transferencia de un motor cd con control de armadura	57
Fig. 44 Sistema de control de líquido.....	58
Fig. 45 Sistema térmico.....	61
Fig. 46 Parte de mando y parte operativa	63
Fig. 47 Fases de diseño del GRAFCET.....	65
Fig. 48 Elementos gráficos del GRAFCET (33)	66
Fig. 49 Conceptos del GRAFCET.....	66
Fig. 50 Instrucción en IL	68
Fig. 51 Ejemplo de programación con IL.....	69
Fig. 52 Ejemplo de línea de programación de ST	70
Fig. 53 Fases de aplicación de la IEC 61499.....	72
Fig. 54 Modelo de software realizado por el estándar IEC 61131	73
Fig. 55 Elementos de LD.....	74
Fig. 56 Conducción lógica e instrucción	74
Fig. 57 Actuador neumático	81
Fig. 58 Aplicación del fuelle neumático.....	82
Fig. 59 Características de trabajo	82
Fig. 60 Válvula reguladora	83
Fig. 61 Sistema de adquisición de señales (40).....	85
Fig. 62 Red de programación de una capa.....	87
Fig. 63 Red de programación multicapa.....	87
Fig. 64 Elementos de prueba	90
Fig. 65 Diagrama funcional	94
Fig. 66 Diagrama de Macro Etapas	95
Fig. 67 Sistema de registro de datos	97
Fig. 68 Sub-sistema de caga	98

Fig. 69 Sub-sistema de temperatura	99
Fig. 70 Sub-sistema de aplicación de giro	100
Fig. 71 Sub-sistema de par	101
Fig. 72 Sub-sistema de registro	102
Fig. 73 Comportamiento de la ecuación que rige el tiempo de muestreo	104
Fig. 74 Ciclo del sistema de carga.....	105
Fig. 75 Ciclo de control de carga.....	105
Fig. 76 Compresor	106
Fig. 77 Vista esquemática del filtro.....	107
Fig. 78 Válvula reguladora	108
Fig. 79 Actuador neumático	109
Fig. 80 Diagrama neumático	111
Fig. 81 Conexión neumática.....	111
Fig. 82 Ciclo del sistema termoelectrico	112
Fig. 83 Ciclo de control del subsistema térmico	113
Fig. 84 Resistencia.....	113
Fig. 85 a) Relevador electromecánico, b) Relevador de estado sólido	114
Fig. 86 Relevador	115
Fig. 87 Diagrama eléctrico	115
Fig. 88 Cableado del sistema eléctrico	116
Fig. 89 Ciclo de sistema de giro	116
Fig. 90 Ciclo de operación del sistema de giro	117
Fig. 91 Transmisión de giro.....	118
Fig. 92 Diagrama de conexiones del motor.....	119
Fig. 93 Conexión del sistema de generación y transmisión de giro	119
Fig. 94 Fuelle neumático	122
Fig. 95 Elementos del sistema de carga.....	122
Fig. 96 Proceso de STE: neumático	124
Fig. 97 Definición del sistema térmico del contenedor de probetas.....	127
Fig. 98 Proceso de STE: Térmico.....	127
Fig. 99 Ángulo de trabajo.....	130
Fig. 100 Par del sistema.....	130
Fig. 101 Diagrama de comportamiento de válvula reguladora	131
Fig. 102 Representación del comportamiento de la Válvula reguladora (Kg/m ²).....	132
Fig. 103 Comportamiento del Actuador neumático	133
Fig. 104 Gráfica del comportamiento del sub-sistema térmico.....	134
Fig. 105 Gráfica de par generado durante la prueba, bajo condiciones definidas.	135
Fig. 106 Configuración de canal y variable.....	138
Fig. 107 Calibración Termopar	139
Fig. 108 Formula de calibración para la carga	139
Fig. 109 Calibración de las celdas de carga.....	140

Fig. 110 Flujo de programación	142
Fig. 111 Ejemplo de programación	143
Fig. 112 Diagrama de flujo de tareas para la automatización del STE: Térmico.....	144
Fig. 113 Tipos de variables para programación.	145
Fig. 114 Adquisición de señales	146
Fig. 115 Generación de señales	146
Fig. 116 Selección de menú.....	147
Fig. 117 Ejemplo de definición de función	147
Fig. 118 Herramienta de control de tiempo.....	147
Fig. 119 Elementos neumáticos que integran el subsistema	153
Fig. 120 Elementos del subsistema térmico	153
Fig. 121 Subsistema de giro	154
Fig. 122 Gráfica de temperatura	157
Fig. 123 Gráfica de carga en estado estable	158
Fig. 124 Ejemplo de reporte de prueba en estado activo.....	159
Fig. 125 Gráfica del comportamiento de la carga en estado activo.....	159
Fig. 126 Gráfica del comportamiento de la temperatura en estado activo	160
Fig. 127 Gráfica del comportamiento del par en estado activo	161
Fig. 128 Carga	188
Fig. 129 Temperatura	189
Fig. 130 Par	189
Fig. 131 Carga	190
Fig. 132 Temperatura	190
Fig. 133 Par	190
Fig. 134 Carga	194
Fig. 135 Temperatura	194
Fig. 136 Par	194
Fig. 137 Marca de desgaste en una prueba de no extrema presión (ASTM 4172).....	195
Fig. 138 Marca de desgaste generada por un ensayo de no extrema presión (ASTM D2266)	195
.....	195
Fig. 139 Marca de desgaste generado por una prueba de extrema presión (ASTM D2783)	196
.....	196
Fig. 140 Marca de desgaste generada por una prueba de extrema presión (ASTM D 2596)	196
.....	196

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación ISO de los lubricantes.....	11
Tabla 2 Clasificación ISO de viscosidad.....	11
Tabla 3 Clasificación de grasas lubricantes según su coeficiente de penetración NLGI	12
Tabla 4 Algunas de las características generales.....	12
Tabla 5 Geometrías de contactos.....	13
Tabla 6 Ejemplo de máquinas en el mercado.....	25
Tabla 7 Tipos de desgaste.....	37
Tabla 8 Clasificación de las grasas dependiendo de su aplicación.....	42
Tabla 9 Analogía fuerza - voltaje	56
Tabla 10 Analogía Fuerza – Corriente	56
Tabla 11 Símbolos para la programación ST	70
Tabla 12 Símbolos de variables Booleanas (Contactos)	74
Tabla 13 Símbolos de variables Booleanas (Bobinas)	75
Tabla 14 Aportación de la ergonomía al ciclo de desarrollo de software.	76
Tabla 15 Metas de diseño	89
Tabla 16 Prueba de grasas lubricantes (ASTM D2596).....	90
Tabla 17 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D4172).....	90
Tabla 18 Prueba bajo la norma DIN.....	91
Tabla 19 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2596).....	92
Tabla 20 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2783).....	92
Tabla 21 No normalizada	93
Tabla 22 Válvulas utilizadas en el STE neumático	110
Tabla 23 Conexiones neumáticas	110
Tabla 24 Elementos neumáticos.....	111
Tabla 25 Descripción del elemento resistivo.....	114
Tabla 26 Elementos integrantes del sistema eléctrico.....	115
Tabla 27 Parámetros para la selección del motor	117
Tabla 28 Elementos eléctricos del sistema de par	118
Tabla 29 Elementos del sistema de transmisión.....	118
Tabla 30 Elementos del motor.....	119
Tabla 31 Cálculos de transferencia de calor	127
Tabla 32 Elementos de sensado.....	136
Tabla 33 Posición de elementos de sensado.....	137
Tabla 34 Características de la tarjeta de adquisición de datos	138
Tabla 35 Ejemplo de muestreo para calibración del sensor de carga.....	140
Tabla 36 Ejemplo de muestreo para calibración del sensor de par	141
Tabla 37 Elementos de programación del sistema	142

Tabla 38 Características de la tarjeta de salidas digitales.....	145
Tabla 39 Clasificación de operaciones	149
Tabla 40 Calificación de usuario	149
Tabla 41 Nivel de usuario.....	150
Tabla 42 Modelado de usuario para diseño de la interfaz	150
Tabla 43 Tabla de pantallas que contiene el sistema.....	151
Tabla 44 Descripción del prototipo.	154
Tabla 45 Datos de prueba en estado pasivo.....	156
Tabla 46 Parámetros de prueba en estado activo.....	158

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El desarrollo de tecnología e investigación es uno de los principales objetivos en el desarrollo de un país, al observar los datos arrojados en diversos estudios de diferentes países desarrollados, se puede verificar que una de las prioridades ha sido el desarrollo de conocimientos y nueva tecnología.

La tribología es una ciencia fundamental por su gran impacto en ámbito cotidiano ya que los fenómenos tribológicos están presentes en gran porcentaje diariamente. Éste ha dedicado todos sus esfuerzos tanto a la docencia, investigación y desarrollo de tecnología, con la cual impulsar el desarrollo de la sociedad. Prueba de ello son las diferentes máquinas de ensayo tribológicos, las cuales se basan en diferentes técnicas, lo cual ha generado no solo la creación de estos mecanismos, sino también basado en esos mecanismos, se han generado investigaciones y desarrollo de nuevos materiales.

1.2. Planteamiento del problema

La Tribología siendo una rama de la ciencia de la Ingeniería Mecánica, estudia los fenómenos presentes en el contacto entre dos elementos así como los efectos que este ocasiona, sin embargo siendo México un país basado económicamente en la industria petrolífera y sus derivados, el conocimiento y por lo tanto la aplicación de esta ciencia son muy limitados, ocasionando grandes pérdidas en todos los recursos involucrados tanto en una operación productiva como de la vida diaria.

Es por esto, que este trabajo está dedicado al desarrollo de una máquina de ensayos tribológicos. Lo cual dará lugar a la creación del mecanismo en sí, y a la utilización del mismo para probar las características de diferentes materiales lubricantes, ya sea graso o aceites, así como verificar su comportamiento de los ya existentes encontrando nuevos uso y confiabilidad en el mercado.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Desarrollar la tecnología que permita crear un sistema funcional de control y automatización para un mecanismo complejo. En particular, el control automático y software de una máquina tribológica basada en la técnica de cuatro bolas para ensayos lubricados, que satisfaga la normatividad internacional correspondiente.

1.3.2. Objetivos particulares

- Desarrolla el control secuencial de una máquina tribológica de cuatro bolas, de acuerdo a las variables de operación más relevantes como son par, velocidad, temperatura y carga, que permitan un buen funcionamiento empleando la automatización del proceso a realizar.

- Diseñar e implementar un sistema de control de lógica difusa el cual registre las variables de entrada (temperatura, carga y velocidad) y salida (incremento de temperatura, par y carga aplicada en un instante temporal), las cuales sirvan para implementar una ley de control ad-hoc que gobierne los ensayos tribológicos basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas.

- Diseñar, Simular y construir el sistema de control que verifique las variables involucradas en una ensayo tribológico de acuerdo a las normas ASTM D259,D278, D226 Y DIN 51350.

1.4. Justificación

El desarrollo tecnológico es una de las principales actividades que contribuyen al progreso de un país como lo establece la ley de CIENCIA Y TECNOLOGÍA (texto vigente última reforma publicada en DOF 21-08-06) en su artículo II, donde se indica que el estudio y desarrollo de conocimientos científicos permite el incrementar, mejorar e innovar las tecnologías vigentes y aplicaciones productivas para el progreso del país (más información ver A1).

El desarrollo del conocimiento técnico se aplica a todas las ramas de la ciencia conocida, este estudio se enfoca a un área multidisciplinaria de la ciencia de la ingeniería mecánica; donde se ubica la ciencia de la Tribología.

La Tribología estudia la fricción, desgaste y sus efectos asociados, toma en cuenta entre otros aspectos, el de la maquinaria industrial: el diseño, los materiales de las superficies en contacto, el sistema de aplicación de la lubricación, el medio ambiente circundante y en general las condiciones operativas. (1)

Sus principales contribuciones en el aspecto industrial son:

- Aumento de la productividad
- Reducción de las fallas mecánicas en los equipos.
- Mayor Confiabilidad en los Procesos
- Incremento en la vida útil de los equipos
- Mayor eficiencia
- Reducción de costos de producción
- Reducción del desgaste en equipos
- Reducción del consumo de energía por disminución de la fricción y desgaste
- Mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo.
- Cumplimiento de normas internacionales vigentes
- Control y reducción de emisiones
- Incremento en la Calidad (1)

Un ejemplo que ilustra la importancia de la tribología en el mercado, es en el ramo automotriz ya que como uno de los principales consumidores de petróleo (lubricantes y gasolina) este va en aumento conforme al incremento de unidades en el mundo, por lo tanto su uso debe de estar apoyado con el desarrollo de tecnología que ayude a su mejor aprovechamiento. En TOYOTA con su filosofía “Zeronise” and “Maximeze”, tiene como objetivo reducir los efectos negativos del funcionamiento del trabajo motriz, hacia el medio ambiente, tráfico y accidentes viales, sin olvidar maximizar los efectos positivos del conducir. Dado que el automóvil está constituido en gran medida por partes tribológicas específicamente en el motor y la transmisión. Por otra parte, el costo de la implementación

del conocimiento tribológico no resulta ser muy oneroso en relacionan a los efectos nocivos que ocasionan los fenómenos de fricción, desgaste y una deficiente lubricación. Lo que a permitido incrementar la eficiencia de lo motores en un 16% los últimos 20 años y por lo tanto el uso de materiales novedosos que incrementen el rendimiento de éstos; se hace cada vez mas importante. Actualmente, la empresa automotriz Toyota utiliza DLC (Diamond-Like Carbone) que se aplica como recubrimiento anti-desgaste en el embrague (2).

Pero en la mayoría de las ocasiones el aplicación de tecnología se obstaculiza ya que el estudio implica el desarrollo de modelos bajo condiciones diversas y esto resulta costoso y complicado, por lo que actualmente la simulación de fenómenos (químicos, físicos, biológicos, económicos, sociales, etcétera), es una de las herramientas que ayudan a disminuir el costo y el tiempo de estudio de un proceso. En forma general, la simulación se define como “la utilización del computador para la reproducción aproximada y el estudio de fenómenos” (Wachutka, 1994), lo cual es una tendencia actual en el campo de la computación: por un lado el desarrollo de ambientes virtuales y por otro, el de aplicaciones colaborativas. Estas dos tecnologías, nacieron separadamente, pero recientemente se están integrando para obtener lo que se conoce como ambientes virtuales colaborativos. El desarrollo de mundos virtuales tridimensionales, busca ubicar a los usuarios de computadoras, dentro de un ambiente que presenta una realidad alterna a la que viven, con el fin de intentar resolver problemas difíciles de tratar físicamente, predecir el comportamiento de un sistema cualquiera ante diferentes entradas, simular procedimientos costosos, etcétera. Lo que constituye a una área de investigación que implica el tratamiento de muchos problemas interesantes como el modelado tridimensional, la generación de imágenes auxiliado de modelos matemáticos, todo ello, permite obtener un mejor entendimiento acerca de la respuesta y evolución de un sistema físico con condiciones definidas. Esta información es útil para optimización y generación de prototipos, producción y/o experimentación (3).

Para realizar una simulación son necesarios tres componentes básicos:

- La base teórica definen el fenómeno de forma concisa sus diferentes variables, así como su comportamiento y evolución, lo que permite modelarlo matemáticamente y así desarrollar el análisis de forma precisa.
- Los algoritmos facilitan el crecimiento de una secuencia de pasos lógicos que serán ejecutados por el sistema de cómputo para dar una solución al modelado y un estudio más minucioso del problema.
- Conocimiento del lenguaje y técnicas de programación.

Al igual que el proceso de simuladores computacionales, se han desarrollado técnicas y mecanismos que auxilian el diseño de nuevos productos y el desarrollo de tecnologías; definiendo las variables a las cuales el producto se encuentra sometido de forma regular cuando es empleado al entorno productivo (3).

El trabajo propuesto, tiene como finalidad apoyar el desarrollo de la tribología en México, cuyos beneficios tanto en el ramo tecnológico como el económico impactan al país como lo demuestran una gran cantidad estudios y trabajos realizados en los países industrializados, por ejemplo el reporte británico llamado “JOST REPORT” desarrollado a principios de 1966, el cual señala que el mejoramiento y eficiencia en la lubricación y mantenimiento en la industria podría generar un ahorro de 500 millones de libras esterlinas por año. Subsecuentemente, una investigación similar realizada en Alemania, Japón, Canadá y Usa muestran resultados similares, dando como resultado un rango entre un 1.3 al 1.6 % del PIB. (4)

Con el apoyo del colegio académico de la Maestría en Ingeniería de Manufactura de La ESIME Azcapotzalco este trabajo se dirige al diseño y construcción de una máquina de pruebas tribológicas basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, así como en el diseño, simulación y construcción del sistema de automatización y control de la misma. Esta máquina se manufactura con el apoyo del departamento de Mecánica de la ESIME Zacatenco en la línea de investigación de Tribología.

Anexos, Artículo 2.

Se establecen como bases de una política de Estado que sustente la integración del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología, las siguientes:

- I. Incrementar la capacidad científica, tecnológica y la formación de investigadores para resolver problemas nacionales fundamentales, que contribuyan al desarrollo del país y a elevar el bienestar de la población en todos sus aspectos.
- II. Promover el desarrollo y la vinculación de la ciencia básica y la innovación tecnológica asociada a la actualización y mejoramiento de la calidad de la educación y la expansión de las fronteras del conocimiento, así como convertir a la ciencia y la tecnología en un elemento fundamental de la cultura general de la sociedad;
- III. Incorporar el desarrollo y la innovación tecnológica a los procesos productivos para incrementar la productividad y la competitividad que requiere el aparato productivo nacional;
- IV. Integrar esfuerzos de los diversos sectores, tanto de los generadores como de los usuarios del conocimiento científico y tecnológico, para impulsar áreas de conocimiento estratégicas para el desarrollo del país;
- V. Fortalecer el desarrollo regional a través de políticas integrales de descentralización de las actividades científicas y tecnológicas
- VI. Promover los procesos que hagan posible la definición de prioridades, asignación y optimización de recursos del Gobierno Federal para la ciencia y la tecnología en forma participativa(5).

1.5. Introducción

En el mundo se han realizado una gran cantidad de investigaciones sobre los beneficios que conlleva el estudio de la tribología en diversas áreas. Estos beneficios reflejados principalmente en el ámbito económico son fácilmente visualizados, en el aumento de la producción, reducción en fallas mecánicas, confiabilidad en los procesos, incremento en la vida útil del equipo, eficiencia. Esto nos da como resultado una reducción en los costos de producción, mantenimiento y uso de recursos.

Una máquina de ensayos, es conjunto de sistemas que ejemplifican una actividad cotidiana bajo condiciones controladas, la cual sirve para determinar el comportamiento de un elemento, mecanismo o sistema bajo condiciones pre-determinadas. La tribología es una rama de la ciencia de la Ingeniería Mecánica, la cual estudia los cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo así como los fenómenos que de este se generen.

Para el estudio de la tribología existen diversos mecanismos que son utilizados para ejemplificar el trabajo, dependiendo del proceso que se realice. Por lo que existe una gran diversidad de máquinas de ensayos tribológicos.

Este trabajo está dirigido hacia la construcción de un sistema de control y automatización de una máquina de ensayos tribológicos, basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas. Este tipo de máquina realiza pruebas a materiales lubricantes, las cuales están regidas por normas internacionales y se distinguen tanto por las características del material al cual se le realiza el ensayo (Graso o líquido), como el valor asignado a las variables que ejemplifican las condiciones de trabajo (temperatura, velocidad, carga, tiempo).

Para diseñar y construir un sistema de control y automatización que satisfaga las necesidades para las cuales será concebido, lo principal es conocer la meta principal del sistema, para así desglosar las tareas, operaciones y actividades, que realizara cada elemento y componente. Para lograr una descripción completa del sistema, se sirvió de GRAFCET. Esta herramienta nos mostrara una serie de diagramas que representarán el comportamiento del sistema, desde las actividades generales, hasta las particularidades que los diferentes elementos realizaran en cada operación, culminando en una descripción detallada tanto del comportamiento del proceso que seguirá el mecanismo para realizar cada una de las tareas.

Al puntualizar las actividades, se procedió a conocer los elementos que se involucraran para realizar las operaciones así como la combinación y/o su interrelación que guardan entre ellos. Para ello se concentro en el estudio de STE (Sistema de transferencia de energía) de cada uno de los subsistemas que componen el mecanismo y por lo tanto los subsistemas que serán automatizados. El estudio de estos sistemas, se compone del estudio de la energía entrante, pasando por un proceso, para finalizar con la energía necesaria para realizar la tarea.

Para describir este proceso, se definen los modelos matemáticos que describen el comportamiento de cada uno de los elementos que al relacionarse, generan una ecuación de estado de cada uno de los subsistemas de los que está integrado el mecanismo.

Al delimitar la actividad, el proceso con el cual se realizara cada tarea, así como el método y los elementos para realizarla, el siguiente paso es el realizar la programación así como la interfaz que controlara el funcionamiento de la máquina de ensayos.

El comportamiento del ensayo, la precisión de las medidas, al manejo de los datos y la facilidad tanto de manejo como de aprendizaje, los elementos de monitoreo como de actuación, son algunos de los aspectos que deben de ser considerados para el diseño del programa como de la interfaz, arrojando como resultado, un programa eficiente tanto en el aspecto de control como en el sentido de usabilidad.

Con lo expuesto anteriormente, se observa que la principal características de este trabajo, es la presentación cíclica que representa el diseño y construcción de un sistema de control y automatización.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

La innovación sitúa a las empresas en una posición de ventaja competitiva tecnológica. Sin embargo esta es una compleja y de difícil de instrumentar. Las empresas independientes de su tamaño, deben asumir la tecnología como un recurso básico para su competitividad, que obliga a una gran interrelación entre diversas técnicas. Esta interdisciplinariedad constituye una nueva técnica y no se puede obtener mediante la suma de las tecnologías individuales existentes, tal y como tradicionalmente eran empleadas.

En las últimas tres décadas han surgido una gran cantidad de productos, tales como componentes, dispositivos, equipos, máquinas y sistemas productivos con un enfoque interdisciplinarios. Un ejemplo de ellos, son las máquinas de control numérico, prensas hidráulicas, medidores de gases, marcapasos, prótesis, automóviles con control electrónico, supresores de ruido, etcétera. Estos con dispositivos de alta precisión, controlados con sistemas reprogramables y adaptables, haciendo uso óptimo de materiales y energía que consumen, teniendo diseños más estéticos y ergonómicos, guardando una relación “inteligente” con el medio ambiente, este proceso se puede observar en la Fig. 1 (6).

- a. Diseño
- b. Tecnología de información
- c. Metodología
- d. Proceso de desarrollo
- e. Diseño de estándares
- f. Expertos en ingeniería
- g. Investigación de mercado
- h. Expertos en proceso
- i. Análisis técnico
- j. Revisión de prototipo
- k. Producto final y proceso definido

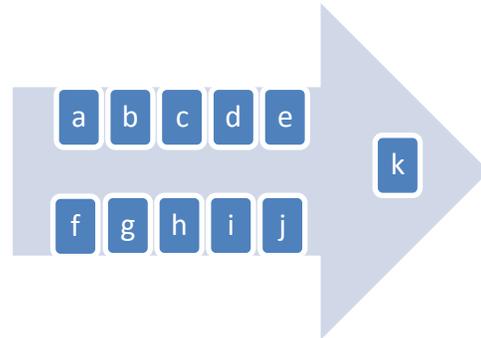


Fig. 1 Convergencia de ideas en el proceso de fabricación de un producto

2.1. Tribología

El primer reconocimiento de la importancia de la tribología fue en hecha por el British “Jost Report” a inicios de 1966, en donde este estimaba que el incremento en la lubricación y el mantenimiento en la industria podrían ahorrar en la economía británica 500 millones de libras esterlinas por año. Subsecuentemente, investigaciones similares desarrolladas en Alemania del este, Japón, Canadá y USA se aprecia un ahorro en el rango de 1.3 al 1.6% del GNP (Gross National Product). La primera investigación en la aplicación de la tribología en china fue desarrollada en 1986, esta investigación se baso en la industria metalúrgica y petroquímica, transportación y mecánica industrial, puntualizan en el ahorro en los aspectos como la fricción, marcaje y lubricación, pueden ser calculados como una

aproximación de 1.37% del PIB (Producto Interno Bruto) a través de una mejor aplicación de la tecnología(7).

Aun que los estudios cuantitativos de la aplicación de la tribología son recientes, la aplicación de la fricción se remonta a la era Paleolítica (1,000,000 -11,000 años a.c.), el cual se refleja, en el descubrimiento del fuego generado mediante la fricción de piedras para generar chispas. La primera civilización registrada en la historia del desarrollo humano fue Mesopotamia (3200 a.c), conocida posteriormente como Babilonia, aportando el descubrimiento de la rueda, y posteriormente la civilización Egipcia, donde concretamente cuenta con cinco desarrollos tribológicos bien documentados en frescos, siendo los siguientes(8):

- Taladros de rotación alterna, los cuales se utilizaban para hacer barrenos y generar fuego,
- La rueda de vasija, empleada como pivote, manufacturada de madera y piedra, facilitando el manejo del barro a altas velocidades.
- El vehículo de ruedas.
- Los lubricantes minerales fueron utilizados para diferentes propósitos, como, facilitar la rotación y la traslación.
- Se utilizaron deslizadores para la transportación de pesadas estatuas de piedra y bloques para construcción.

Aún que Aristóteles (384-322 A.C.) ya había identificado el fenómeno de la fricción, fue, Leonardo di Ser Piero de Vinci (1452-1519 D.C.), quien facilitó su conocimiento gracias a sus experimentos realizados a fines del siglo XV; siendo la primera vez que se estudió de forma “cuasi científica”, además, formuló empíricamente algunos conceptos de fricción, mediante el deslizamiento de objetos sobre superficies pulidas. También, estudió la naturaleza del desgaste, los efectos de los lubricantes y el diseño de rodamientos. Su principal aportación fue, al concepto llamado Coeficiente de Fricción, que lo denominó (Conflagración), que es la razón entre la fuerza de fricción y la carga normal, obteniendo el valor experimental de 0.25. Más adelante, sus observaciones empíricas, se convirtieron en las leyes de la fricción. Aunque, la mayor parte de la obra escrita por Leonardo da Vinci fue publicada hasta 1960(9).

Posteriormente el físico francés Guillaume Amontons (1663 – 1705) quien de forma independiente al trabajo de Leonardo, estudió la fricción en condiciones lubricadas y no lubricadas. Postuló las siguientes conclusiones:

- La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto.
- La fuerza de fricción es dependiente de la fuerza normal ejercida sobre el cuerpo.

Dichos estudios realizados por Amontons, fueron aceptados con cierto escepticismo por la Academia de Ciencias Royal de París, el 19 de diciembre de 1699. Los cuales posteriormente fueron verificados por el científico francés Charles Augustin de Coulomb en 1781 (10).

2.1.1. Lubricación

Para el final de 1976, la industria petrolera, una de las más grandes del mundo realizó una modernización de sus plantas y equipos con una inversión de aproximadamente de 377 billones de dólares de los cuales 149 billones de dólares quedaron en Estados Unidos de América, y 288 billones de dólares se repartieron en varias partes del mundo(11). Por lo tanto la investigación y el mejoramiento de sus productos se consideran de primera necesidad para el desarrollo y crecimiento económico de cualquier país.

Se pueden distinguir tres tipos de lubricación:

- Lubricación límite.
- Lubricación mixta.
- Lubricación hidrodinámica.

En la industria se utilizan diversos tipos de lubricantes, dependiendo de los requisitos de aplicación importantes de carácter general utilizados en los equipos de proceso:

Protección de los componentes de la máquina contra el desgaste y la corrosión.

- Disipación de calor debido a fricción.
- Transferencia de energía/calor o frío.
- Larga vida de servicio.
- Inocuo para los alimentos, inodoro, incoloro e insípido debido a la gran diversidad de requisitos y condiciones de empleo, es imposible encontrar un único lubricante que sea adecuado para todas las aplicaciones, que tenga un precio económico y cuya fiabilidad esté a toda prueba.

Cualquier lubricante debe de llevar a cabo diversas tareas y satisfacer muchos requerimientos dependiendo del proceso y/o tarea a desarrollar, esto se dividen en primarios y secundarios como:

- Evitar/reducir fricción/desgaste.
- Disipar calor (aceites lubricantes).
- Acción de sello.
- Proteger contra la corrosión.
- Transmisión de fuerza (aceite hidráulico).
- Separar con rapidez aceite y agua.
- No mostrar tendencia a la formación de espuma.
- Compatibilidad con otros mecanismos de la máquina tales como elementos de sellado, pinturas y pegamentos.
- Uso a altas y/o bajas temperaturas.
- Buena filtrabilidad (aceites lubricantes).
- Resistencia al agua y/o al vapor.
- Largo tiempo de servicio (económico).
- Constituyentes no tóxicos.
- Satisfacer requerimientos de elevada pureza en relación a olor, color y sabor.

- Clasificación en algún estándar industrial reconocido.
- Rápidamente biodegradable.

Para seleccionar el lubricante adecuado, la industria de maquinaria y lubricación, y los organismos de normalización han desarrollado diversas normas y especificaciones. La ISO (Organismo Internacional de Estandarización) ha elaborado dos normas importantes relacionadas con los lubricantes.

La ISO 6743 divide los lubricantes industriales en 14 familias distintas, dependiendo de la aplicación, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1 Clasificación ISO de los lubricantes

Categoría	ISO-L-6743
Aceite de engranajes	Parte 6, familia CKB
Aceites hidráulicos	Parte 4, familia HM y HV
Aceite de compresores	Parte 3, familia DA (succión), o DV (rotatorios)
Grasas lubricantes	Parte 9, familia X
Aceite térmicos	Parte 12, familia Q

Una de las normas más conocidas en la clasificación ISO de la viscosidad para aceites lubricantes industriales en clases ISO VG (ISO 3448 “Clasificación ISO de la viscosidad de los lubricantes líquidos industriales”) que se presenta en la

Tabla 2, la clasificación ha sido diseñada de tal forma que todos los rangos de viscosidad, desde los valores más pequeños a los valores más grandes, se ha dividido en 18 niveles, con valores claramente definidos, usando esta norma se puede comparar fácilmente los aceites lubricantes por su viscosidad.

Tabla 2 Clasificación ISO de viscosidad

ISO VG Número	Limite de viscosidad (mm^2/sc 40C)	ISO VG Número	Limite de viscosidad (mm^2/sc 40C)
2	1.98-2.42	68	61.2-74.8
3	2.88-3.53	100	90.0-110
5	4.14-5.06	150	135-165
7	6.12-7.48	220	198-242
10	9.00-11.0	320	288-352
15	13.5-16.5	460	414-506
22	19.8-24.2	680	612-748
32	28.8-35.2	1,000	900-1,100
46	41.4-50.6	1,500	1,350-1,650

Otra norma para clasificar grasas lubricantes de acuerdo con su consistencia es la antigua, pero aún vigente, clasificación NLGI del instituto nacional de grasas lubricantes, mostrada en la Tabla 3 (12):

Tabla 3 Clasificación de grasas lubricantes según su coeficiente de penetración NLGI

NLGI Número	Penetración D127 (Manipulado a 25°C)	ASTM	Consistencia	Área general de aplicación
00	430-400		Fluida	Engranaje, sistema de lubricación a automática
0	385-355		Semifluida	Cojinetes sometidos a cargas baja, sistema de lubricación automática, baja temperatura
1	340-310		Muy suave	Cojinetes y guías sometidos a cargas ligeras, sistemas de lubricación automática
2	285-265		Suave	Cojinetes y guías sometidos a cargas moderadas/pesadas, velocidades medias, sistemas de lubricación manual
3	250-220		Semisólida	Cojinetes cerrados herméticamente, cojinetes sometidos a cargas moderadas/pesadas, velocidades elevadas

Estas características pueden resumirse como se muestra en la Tabla 4

Tabla 4:

Tabla 4 Algunas de las características generales

Grupo	Especificación/Norma	Proporciona información sobre:
Aceites hidráulicos	DIN 51524, parte 2 y 3, también conocida como: DIN HLP y HVLP	General. Protección contra el desgaste y corrosión, vida de servicio del aceite, comportamiento en circuitos herméticos, prevención de formación de espuma
Aceite de engranes	DIN 52517, parte 2, también conocida como DIN CLP	General, protección contra desgaste y corrosión, comportamiento en circuitos herméticos.
Aceite de compresor	DIN 51506, VBL y VCL	General, protección frente a sedimentos, vida de servicio de aceite, protección contra el desgaste.
Lubricante de cadena	DIN 52354	Verificación FZG, protección contra el desgaste
Grasas lubricantes	DIN 51350 DIN 51808 DIN 51811 DIN 51807	Prueba de 4 bolas, protección contra el desgaste, protección contra la corrosión, formación de espuma en los sistemas de lubricación, resistencia al agua, vida de

			servicio
Aceite térmico	DIN 51758		Punto de inflamación, seguridad de incendios
	DIN 51551		Prevención de sedimentos
Fluidos refrigerantes secundarios de refrigeración	Para circuitos		Protección contra la corrosión
	DIN 3016		Protección contra congelación

2.1.2. Pruebas tribológicas

Existen tres niveles de pruebas tribológicas:

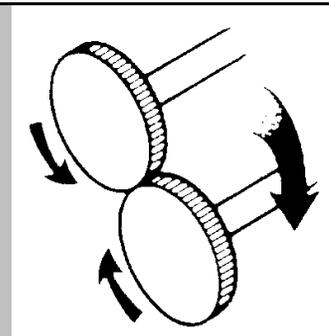
Tribómetros

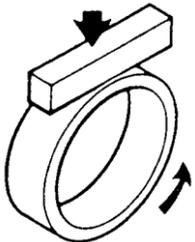
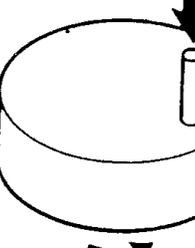
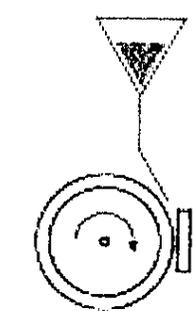
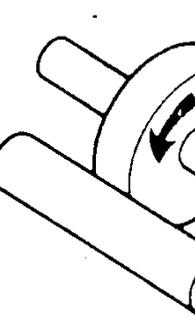
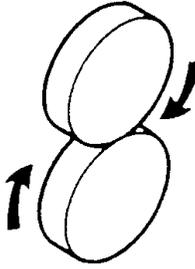
Componentes

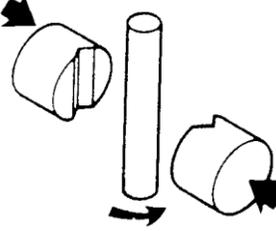
Sistemas o mecanismos

La Sociedad de Tribólogos, Lubricación e Ingenieros, STLE (por sus siglas en inglés), en los laboratorios de la investigación, presenta los resultados de un estudio extenso de fricción, y que puso a disposición del público. La publicación tiene 234 modelos, basados en las categorías detectadas en la macro geometría del contacto mecánico, como se muestra en la Tabla 5. Existen actualmente registrados 270 equipos para la medición de la fricción y el desgaste(13).

Tabla 5 Geometrías de contactos

CONFIGURACIÓN	NOMBRE	PROPOSITO	CONDICIONES
	Desgaste de engranes. “Gear Scuffing”	Generar las condiciones para que un par de engranes sufran desgaste por escofinado, en materiales usados en engranes	Número de dientes, de 15 a 16, velocidad del piñón 2000 rpm, carga incremental en pasos, bañados en lubricante.
	Cuatro bolas “four ball”	Generar las condiciones en las que una película de lubricante pierde sus propiedades mecánicas y físicas.	Velocidad de la cuarta bola, 1750 rpm, carga normal variable con un máximo de 1000 kgf.

	<p>Bloque sobre anillo "Block on ring"</p>	<p>Generar el desgaste adhesivo de los materiales contra un disco de acero SAE 4620</p>	<p>Velocidad del anillo, 197 rpm, con una carga mínima de 340 N máxima de 2800 N y con una duración de 20,000 ciclos</p>
	<p>Perno sobre disco "Pin on disc"</p>	<p>Generar el desgaste deslizante de un perno sobre un disco giratorio</p>	<p>Velocidad del disco, 60 a 600 rpm carga aplicada al perno, variable</p>
	<p>Arena seca/disco metálico vulcanizado "Sand and disc"</p>	<p>Generar el desgaste abrasivo de una probeta sobre un disco vulcanizado ya sea en condición seca o húmeda.</p>	<p>Velocidad del disco metálico vulcanizado 200 rpm, carga aplicada, 130 N, flujo de arena, 300 a 400 g/min</p>
	<p>Fatiga Fatiga por contacto de rodadura "Roller Contact"</p>	<p>Generar la fatiga por contacto de rodadura en materiales con tratamiento comúnmente usado en engranes.</p>	<p>Velocidad del disco, 1050 a 1500 rpm, carga variable.</p>
	<p>Discos rodantes encontrados "Amsler"</p>	<p>Generar el desgaste por deslizamiento en materiales base y con tratamiento superficial.</p>	<p>Velocidad del disco inferior, 400 rpm, velocidad del disco superior 440 rpm, con una carga de 196 N puede ser en condición seca o lubricada.</p>

	Perno sobre bloques "Pin on V blocks"	Generar el desgaste calculando la capacidad de carga y el coeficiente de fricción para contacto deslizante.	Velocidad de la flecha 290 rpm de velocidad de deslizamiento 0.1 m/s ² , carga de 89-20,000 N
---	---------------------------------------	---	--

2.2. Control y automatización

EL desarrollo de esta área de conocimiento se ha desarrollado en los últimos 60 años de una manera sorprendente, siendo una de las principales áreas de estudio, gracias a su enfoque multidisciplinario tanto de su campo de estudio como de aplicación. Sin embargo la base de su desarrollado está soportada por la resolución de los diferentes problemas prácticos a los cuales se ha enfrentado en el transcurso de la historia de la humanidad. Los progresos más remarcados relacionados con el perfeccionamiento del control automático realimentado han sido(14):

- La preocupación de los pueblos griegos y árabes de poseer una medida precisa del paso del tiempo. Este periodo va desde el 300 a.C. hasta el 1200 d.C. (aproximadamente)
- La revolución industrial en Europa, desde el siglo XVII hasta fines del siglo XVIII
- El inicio de las telecomunicaciones y las dos grandes guerras mundiales, que representan el periodo de 1910 a 1945
- El inicio de la era espacial y de los computadores a fines de los años cincuenta e inicios de los sesenta del siglo XX

2.2.1. El control en la antigüedad

En la antigüedad el ser humano se percató de que existían tareas que se podían realizar e incluso mejorar por medio de sistemas mecánicos, hidráulicos, etcétera más o menos complejos (15). Comenzó a crear artefactos y máquinas encargadas de realizar tareas diarias y comunes con el objetivo de facilitar las actividades cotidianas. No todos los artefactos tenían un objetivo práctico o pre-industrial, también algunas máquinas solo eran para entretener.

Los primeros ejemplos de autómatas se registraron en la antigua Etiopía. En el año 1500 a.C., Amenhotep construye una estatua de Momon, el rey de Etiopía, que emite sonidos cuando la iluminan los rayos del sol al amanecer. En china, en el 500 a.C., King-su Tse desarrollo una urraca voladora de madera y bambu, y un caballo de madera que saltaba. En el año 206^a. C., fue encontrado el tesoro de Chin Shih Hueng Ti consistente en una orquesta mecánica de muñecos, encontrada por el primer emperador Han (15).

Los ingenieros griegos aportaron grandes conocimientos en el campo de los autómatas, ya que entre 400 y 397 a. C., Archytar de Tarento construyó un pincho de madera suspendido

de un pivote, el cual rotaba con un surtidor de agua o vapor, simulando el vuelo. Archytar se le atribuye la invención del tornillo y la polea (15).

Hacia el año 270 a.C. el griego Ktesibios invento un regulador de flotación para un reloj de agua. La función del regulador era mantener el nivel de agua en un depósito a una altura constante (control de nivel), de forma que el caudal saliente por un tubo situado en el fondo del tanque llevase a un segundo depósito a una velocidad constante. El llenado del segundo depósito determinaba el tiempo transcurrido. El regulador de Ktesibios mostrado en la Fig. 2, utilizaba un flotador como elemento actuador del sistema para controlar la entrada a través de una válvula, de forma que si el nivel de agua descendía, la válvula se abría y el depósito se llenaba (Primer sistema de control de realimentación)(14).

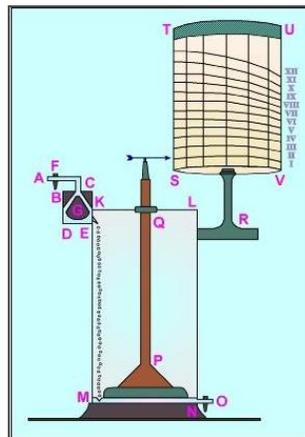


Fig. 2 Reloj de Agua de Ktesibios, reconstruido por H. Diels

En el año de 62 Heron de Alejandría describe múltiples aparatos en su libro “AUTÓMATA”. Entre ellos aves que vuelan, gorjean y beben. Todos ellos diseñados como juguetes.

La cultura árabe heredó y difundió los conocimientos griegos, aplicándolos no solo en mecanismos dirigidos a la recreación, sino dirigidos también a aplicaciones en la vida diaria de la realeza, como dispensadores de agua para beber o lavarse.

En la edad media se desarrollaron otros autómatas, hasta lo que en nuestros días solo han llegado algunas referencias y no documentación. Como el hombre de hierro de Albert Magno (1204-1282) o la cabeza parlante de Roger Bacon (1214-1294)

Un ejemplo de la época fue el Gallo de Estrasburgo, que se presenta en la Fig. 3, que funcionó desde 1352 hasta 1789, siendo el autómata más antiguo que se conserva hasta la actualidad(15).

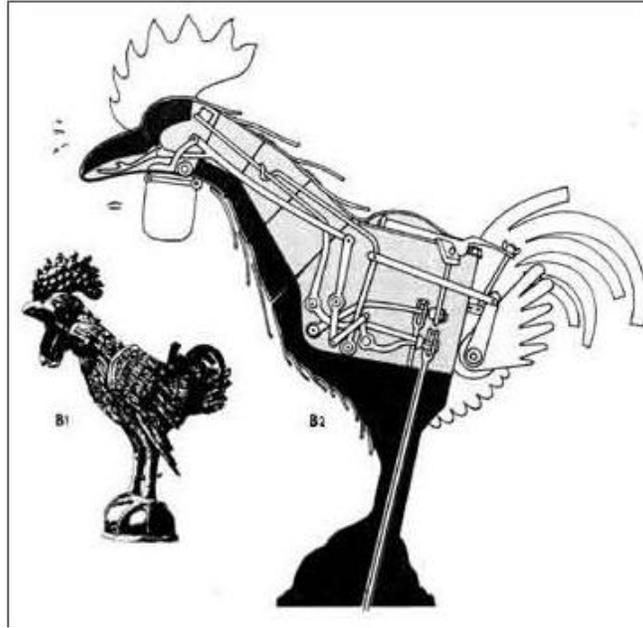


Fig. 3 Gallo de Estrasburgo

En los siglos XV y XVI algunos de los representantes del renacimiento se interesan por los mecanismos descritos por los griegos, como por ejemplo Leonardo Da Vinci (1452-1519), quien construyo para el rey Luis XII de Francia el “León Mecánico”, que se abría el pecho con una garra y mostraba el escudo del rey.

2.2.2. La revolución industrial

La revolución industrial supuso en Europa la invención de máquinas auto dirigidas avanzadas, como son molinos de grano, hornos, calderas y la máquina de vapor. Estos mecanismos no podían regularse manualmente de manera adecuada, por lo que se diseñaron posteriormente lo llamados reguladores de presión, temperatura, velocidad, etcétera, algunos ejemplos de estos son:

- Molinos: Se logra la regulación del caudal de entrada de grano al molino en función de la velocidad de rotación de la piedra del molino (1588), así como la regulación constante de la posición del molino de viento con respecto a la su dirección (1745). Además se desarrollaron sensores de medida para determinar la velocidad de rotación.
- Reguladores de temperatura: Cornelis Jacobszoon Drebbel ideó un sistema de control de temperatura automático, el termostato, para un horno en 1624,
- Reguladores de flotación: la regulación del nivel del líquido se volvió imprescindible en dos áreas principales de aplicación: la caldera de una máquina de vapor y el sistema doméstico de distribución de agua.
- Reguladores de presión: Se utilizaron para mantener constante la presión dentro de la caldera que dirige la máquina de vapor. En 1803, Matthew Boulton y James Wat

combinaron un regulador de presión y un regulador de flujo para utilizarlo en las máquinas de vapor.

- Gobernadores centrífugos: En 1788, James Watt completó el diseño de un gobernador centrífugo con realimentación automática para regular la velocidad rotacional de la máquina de vapor.

A partir de esa época, el desarrollo de los automatismos se presenta de manera elevada, en muchos mecanismos se incorporan elementos mecánicos como los programadores cíclicos en los cuales se definía la secuencia de operación(14).

2.2.3. Sistema de transmisión de energía

Establece una relación entre una fuente motriz y un mecanismo que utiliza la energía mecánica producida por una fuente para efectuar un trabajo mecánico útil, como se muestra en el diagrama en la Fig. 4. Este puede ser de tres tipos:

- Mecánicos: Prácticos y económicos en ciertos casos, pero pesados, complicados y costosos en otros.
- Eléctricos: Simples y flexibles
- Fluidos a presión: Anteriores a los eléctricos, pero se han desarrollado más lentamente, teniendo un auge gracias a la aeronáutica por su buena relación entre potencia/peso. Estos pueden ser sistemas hidráulicos o neumáticos.

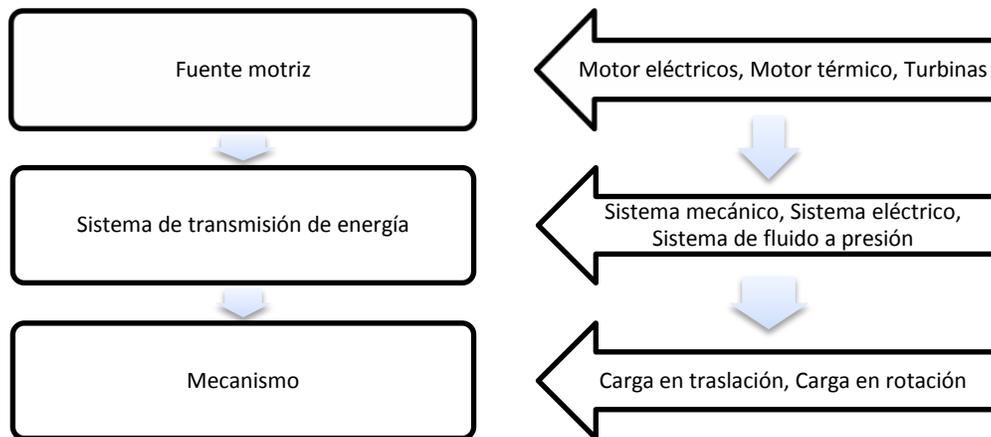


Fig. 4 Elementos de un sistema de transmisión de energía

Componentes pasivos: No desempeñan un papel directo en la transmisión de energía

- Sistemas eléctricos: Disyuntores, arrancadores
- Sistemas fluidos: Depósitos, intercambiadores, filtros
- Sistemas mecánicos: Lubricantes

Componentes activos: Permiten la transferencia o modulación de la energía

- **Generadores:** absorben energía mecánica producida por la fuente motriz, la transforman y la restituyen en una forma nueva, pueden ser:
 - Sistemas eléctricos: generadores eléctricos
 - Sistemas de fluidos: Bombas, ventiladores
 - Sistemas mecánicos: no transforman la energía solo la transportan
- **Moduladores:** Adaptan la energía suministrada por los generadores
 - Sistema eléctrico: Transformadores de tensión e intensidad
 - Sistemas fluidos: Válvulas direccionales, reguladoras de presión y caudal
 - Sistemas mecánicos: Embrague y frenos
- **Receptores:** Absorben la energía de los generadores, modulada y transformada en energía mecánica
 - Sistemas eléctricos: Motores eléctricos (DC,AC)
 - Sistemas fluidos: Cilindros, motores
 - Sistemas mecánicos: no es necesario

Componentes de unión: Aseguran el transporte de la energía de un componente activo a otro, desde la fuente hasta el receptor del trabajo

- Sistemas eléctricos: Cables
- Sistemas fluidos: Tuberías, conductores
- Sistemas mecánicos: Ejes, cadenas, correas, engranajes

Esto se ejemplifica en la Fig. 5:

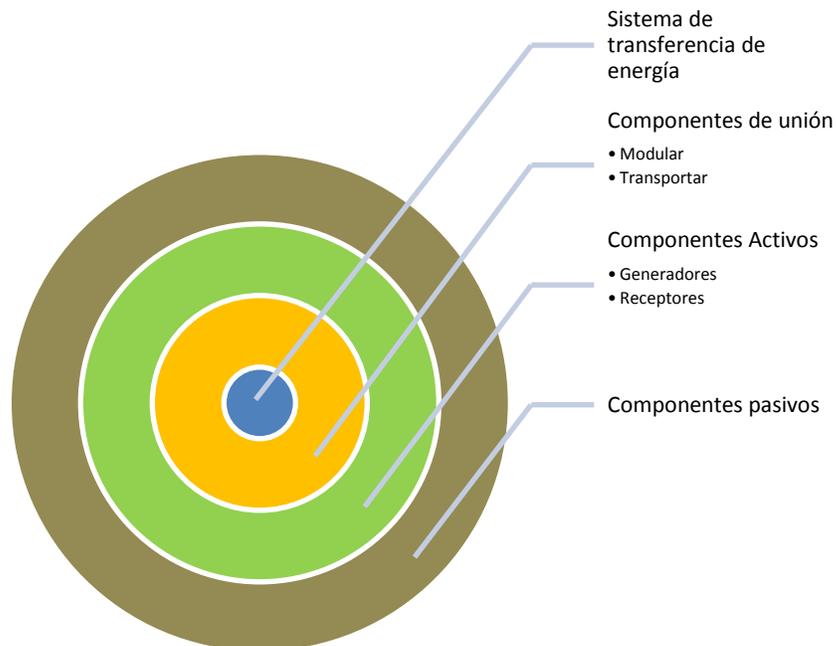


Fig. 5 Componentes de un sistema de transmisión de energía

2.3. Usabilidad

Por el incremento en el uso de procesadores de datos en todos los campos de la vida (educación, industria, etcétera) la atención a un uso amigable en el diseño del software ésta incrementando cada vez mas. La calidad y aceptabilidad de un sistema de interfaz Usuario – Computador depende en gran medida de un diseño ergonómico de la interfaz de usuario. En el pasado, los aspectos ergonómicos fueron olvidados en el desarrollo de sistemas informáticos y del software. Por esto, muchos usuarios se quejaban de los problemas en el aprendizaje para el uso de un producto o su insuficiente funcionalidad y su complejidad en la interacción.

La norma ISO 9241-10 “Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs), Part 10: Dialogue Principles” describe siete principios ergonómicos que de forma independiente deben de cumplir cualquier técnica de dialogo. Estos están presentes en sus estándares sin ninguna referencia para la situación de aplicación, uso, medioambiente, tecnología o tipo de uso, estos son:

- Apto para cumplir las tareas asignadas
- Auto descriptivo
- Controlabilidad
- Conformidad con las expectativas de uso
- Idóneo para su individualización
- Capacitado para su aprendizaje

Estos principios pueden ser considerados como expectativas generales para el diseño de una interfaz amigable para el usuario, software o base de datos(16).

2.4. Máquinas tribológicas

El estudio de las diferentes causas y efectos del deterioro producido en la maquinaria por los fenómenos tribológicos presentes en los diferentes mecanismos, han sido objeto de estudio desde hace cientos de años. Sin embargo, los datos históricos, muestran que el primer mecanismo desarrollado para los estudios tribológicos bajo condiciones controladas, se remonta al siglo XV, donde el inventor e ingeniero Leonardo Da Vinci, en el recopilado de sus escritos llamado “Atlánticos”, destaca el bosquejo de diferentes sistemas mecánicos, para el desarrollo de pruebas tribológicas, como se muestra en la Fig. 6 (17):

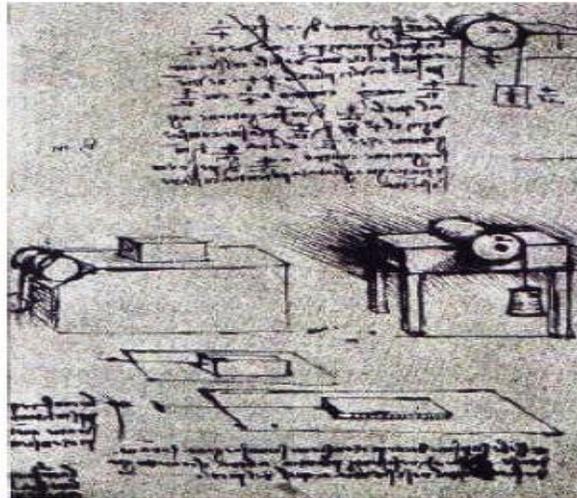


Fig. 6 Equipo diseñado por Leonardo Da Vinci para medir la fuerza de fricción

En la actualidad hay varios sistemas, los cuales por su configuración desarrollan diferentes modelos de contacto para simular los diferentes pares ocurridos en la vida. Algunas de estas importantes configuraciones se muestran a continuación. Todas estas parejas tribológicas pueden tener contacto en un punto, línea o superficie de contacto en la interfaz entre las dos superficies de prueba, estos se ejemplifican en la Fig. 7.

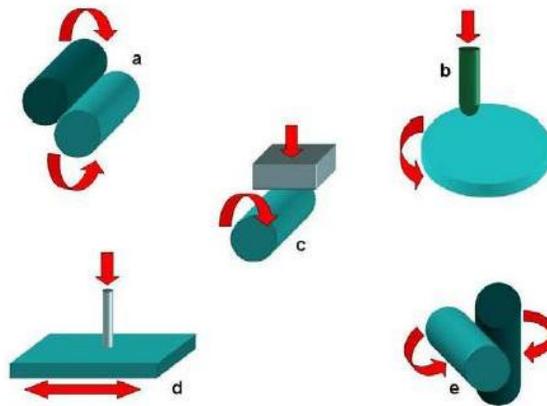


Fig. 7 Configuraciones de prueba. a) Contacto lineal b) Contacto puntual c) Contacto lineal d) Contacto superficial circular e) Contacto puntual

Estas diferentes configuraciones, que representan los diferentes contactos, han sido tomadas como base para desarrollar diferentes sistemas que simulan el contacto existente en la vida diaria. Ejemplo de esto es la máquina tribológica de cuatro bolas, a la cual está enfocado este estudio.

La máquina de ensayos tribológicos, basada en la técnica de cuatro bolas, está desarrollada con el objetivo de realizar pruebas rápidas y eficientes a los diferentes lubricantes ya

existentes o en desarrollo. Estas pruebas están basadas en normas internacionales como son:

- ASTM D2266 Standard test method for wear preventive characteristics of lubricating grease.
- ASTM D2596 Standard test method for measurement of extreme- pressure properties of lubricating grease.
- ASTM D2783 Standard test method for measurement of extreme- pressure properties of lubricating fluids.
- ASTM D4172 Standard test method for wear preventive characteristics of lubricating fluid.

Uno de los antecedentes más importantes del uso de esta máquina, se desarrollo en el año de 1940, cuando Beek, Givens y Smite la utilizaron para la investigación de las propiedades de la capa límite lubricante.

El método de ensayos tribológicos basado en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, se desarrolla como:

- Método:

Tres bolas de acero de 1/2in (12.7mm) de diámetro son colocadas juntas y cubiertas con el lubricante a evaluar. Una cuarta bola de las mismas dimensiones y material, referida como la bola superior, es presionada con una fuerza de 40 kgf (392 N, esta carga solo aplica para la prueba especificada por la norma ASTM D2266, de la cual se tomo como base para ejemplificar el funcionamiento y enlistar las características de un ensayo tribológico mencionado) dentro de la cavidad formada por las tres bolas juntas para tener tres puntos de contacto. La temperatura del aceite lubricante a evaluar es regulada a 75°C (167 °F), después la bola superior es girada a 1200 rpm por un tiempo de 60 min. Los lubricantes son comparados usando el promedio del diámetro de las huellas de desgaste en las tres bolas inferiores.

- Uso:

El método de “four-ball wear-test” puede ser usado para determinar las propiedades relativas de desgaste de una grasa (material lubricante) bajo ciertas condiciones de prueba, sí estas condiciones son modificadas, la clasificación puede ser cambiada. No se ha establecido una relación directa entre el ensayo de desgaste basado en el método de cuatro bolas y el campo de servicio. El método de ensayo no puede ser usado para diferenciar entre la prueba de extrema presión (EP) y la no extrema presión (No-EP) para grasas lubricantes.

- Condiciones de prueba:

El ensayo debe cumplir estas condiciones, el cual se ejemplifica en la Fig. 8:

Temperatura	$75 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($167 \pm 4^{\circ}\text{F}$)
Velocidad	1200 ± 60 rpm
Duración	60 ± 1 min
Carga	40 ± 0.2 Kgf (392 ± 2 N)

- Proceso:
 - Limpiar completamente las cuatro bolas que se utilizaran en el ensayo. Limpie completamente el recipiente donde se colocara el arreglo de ensayo.
 - Colocar una de las bolas dentro del sujetador (este paso podrá ser o no requerido dependiendo del sistema de sujeción que contenga la máquina de ensayos de la cuarta bola). Coloque el sujetador en la máquina.
 - Colocar una pequeña cantidad del material lubricante dentro del recipiente de ensayos, suficiente para llenar el espacio dejado entre el arreglo de las tres bolas base que serán insertadas en el fondo del recipiente.
 - Introducir la bola que se encuentra en el sujetador completamente en el recipiente, después llene este con el elemento lubricante a probar.
 - Colocar el arreglo base (tres bolas unidas, en el recipiente) en la máquina de ensayos y cierre el recipiente, aplique la carga de trabajo.
 - Antes de aplicar por completo la carga, encender el control de temperatura y caliente el arreglo hasta la temperatura de ensayo.
 - Cuando se alcance la temperatura deseada, completar la carga necesaria para la prueba. Cuando estos parámetros se cumplan, encienda el motor que aplicara la rotación de la cuarta bola a la velocidad deseada.
 - Después de cumplido el tiempo de duración de la prueba, retirar el recipiente de la máquina y limpie completamente todo el arreglo.
 - Por último, medir el diámetro de las marcas dejadas por el ensayo en las tres bolas base por medio de un microscopio y compárelo con los resultados obtenidos anterior mente (18).

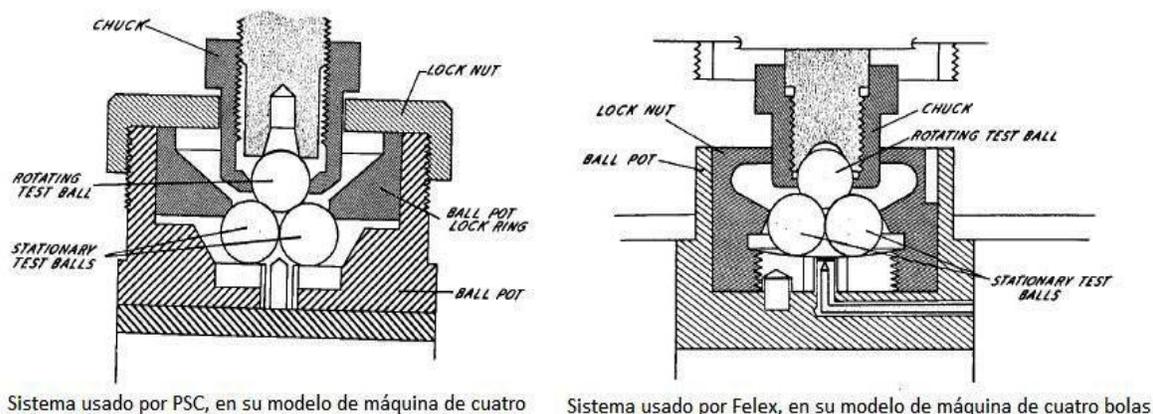


Fig. 8 Ejemplo de sistema de sujeción

Para el desarrollo de estas pruebas, se han diseñado y construido diversas máquinas la cuales, bajo diferentes sistemas de transmisión de energía y sistemas de control buscan producir de manera eficiente este ensayo. Como se observa en la Fig. 9:

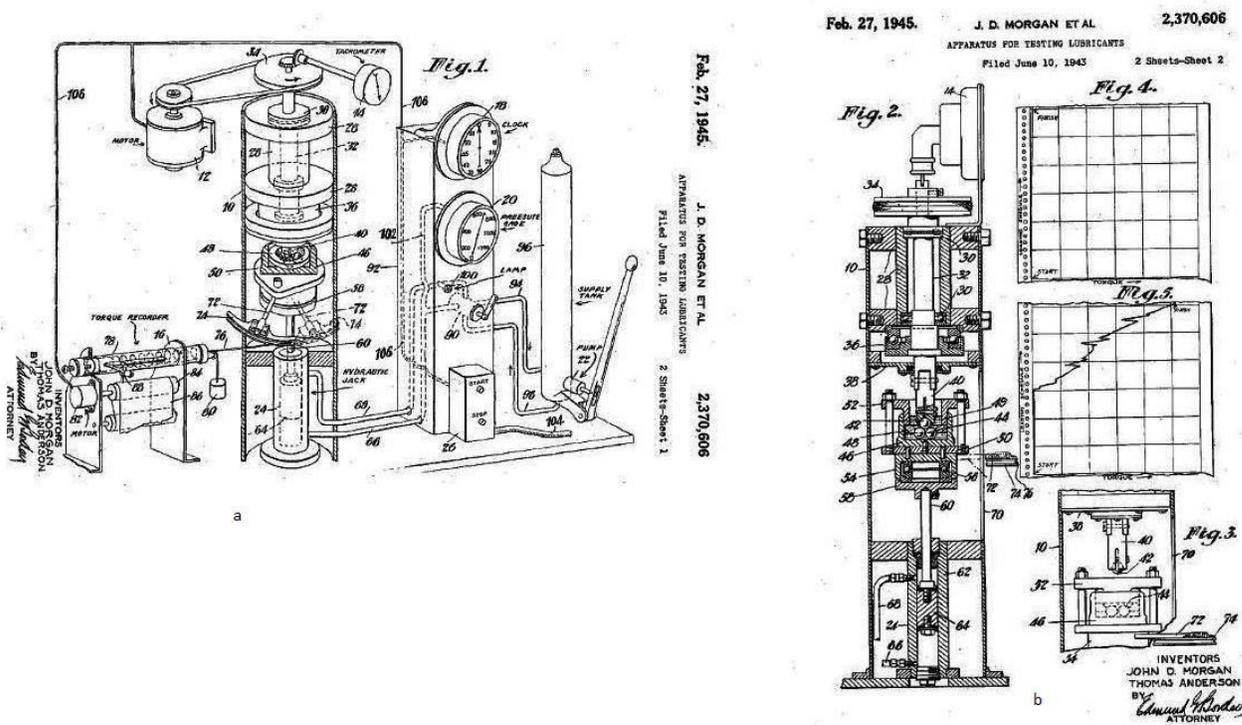


Fig. 9 Aparato para pruebas a lubricantes, Patente 2,370,606 1945, a) Dibujo1, b) Dibujo2

En la actualidad en el mercado existen diferentes máquinas dedicadas al desarrollo de estas pruebas, estas se diferencian por la calidad y los sistemas que aplican para cumplir con su objetivo, algunos ejemplos de estas se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6 Ejemplo de máquinas en el mercado

Máquina	Características
<p data-bbox="212 300 354 369">Imperial Industries</p> 	<p data-bbox="480 300 597 331">Scientific</p> <p data-bbox="623 300 821 331">STE: Neumática</p> <p data-bbox="623 338 862 369">Caga: 1000 kg max.</p> <p data-bbox="623 375 850 407">Motor: 2Hp/220 V.</p> <p data-bbox="623 413 1073 445">Velocidad: variable de 60 – 3000 rpm.</p> <p data-bbox="623 451 1195 483">Temperatura: De temperatura ambiente a 250°C.</p> <p data-bbox="623 489 1192 520">Fuerza de fricción: Medición por celda de carga.</p> <p data-bbox="623 527 1349 558">Tiempo de prueba: Cronometro para inicio y paro automático.</p> <p data-bbox="623 564 1135 596">Monitoreo: Sistema digital de visualización</p>
<p data-bbox="212 617 321 648">K93100</p> 	<p data-bbox="623 617 808 648">STE: Mecánica</p> <p data-bbox="623 655 1219 686">Caga: 10000 N a 3000 rpm o 12000 N a 1800 rpm.</p> <p data-bbox="623 693 980 724">Motor: 1.5 Hp, 220 V o 440 V.</p> <p data-bbox="623 730 1029 762">Velocidad: variable de 300 - 1800.</p> <p data-bbox="623 768 1118 800">Temperatura: controlada electrónicamente</p> <p data-bbox="623 806 1053 837">Fuerza de fricción: Medición sensor.</p> <p data-bbox="623 844 1029 875">Tiempo de prueba: de 1/9999 min.</p> <p data-bbox="623 882 1135 913">Monitoreo: Sistema de adquisición de datos</p>
<p data-bbox="212 926 399 957">IDP Aparatos</p> 	<p data-bbox="623 926 808 957">STE: Mecánica</p> <p data-bbox="623 963 1037 995">Caga: 600 kg sin pesas adicionales.</p> <p data-bbox="623 1001 1195 1033">Motor: 1.5 kw/60 Hz/220 V, 1.5kw/50 Hz/440 V.</p> <p data-bbox="623 1039 1216 1071">Velocidad: Variable de 1000-3000 rpm, 300-3000.</p> <p data-bbox="623 1077 1127 1108">Temperatura: Controlada electrónicamente</p> <p data-bbox="623 1115 1192 1146">Fuerza de fricción: Medición por celda de carga.</p> <p data-bbox="623 1152 1399 1228">Monitoreo: Sistema de adquisición de datos y presentación gráfica</p>

2.4.1. Investigaciones actuales

Una amplia variedad de componentes tribológicos son requeridos para operar en el ambiente espacial para una amplia duración y un bajo par. Satélites vehículos espaciales tienen contacto en bujes y rodamientos en componentes como escotillas, manipuladores, controles de giro, antenas y mecanismos de cámara, escáner infrarrojo horizontal, etcétera.

Para esto se desarrollan mecanismos que ejemplifican el trabajo en el espacio, basados en los sistemas actualmente existentes adaptados simular las condiciones en el espacio, estas se muestran en las Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 y Fig. 13 (19).

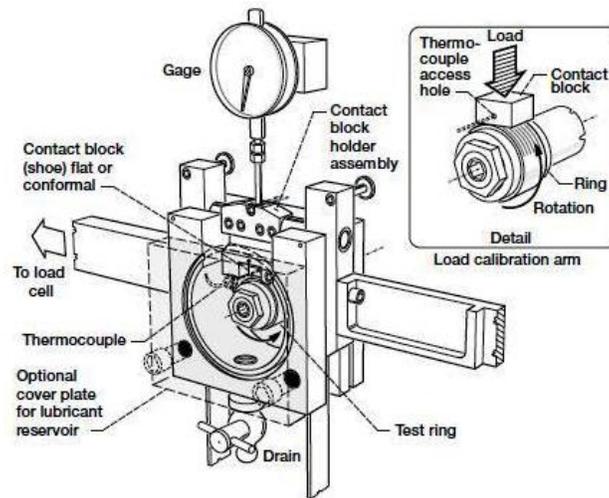


Fig. 10 Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Block-on-ring

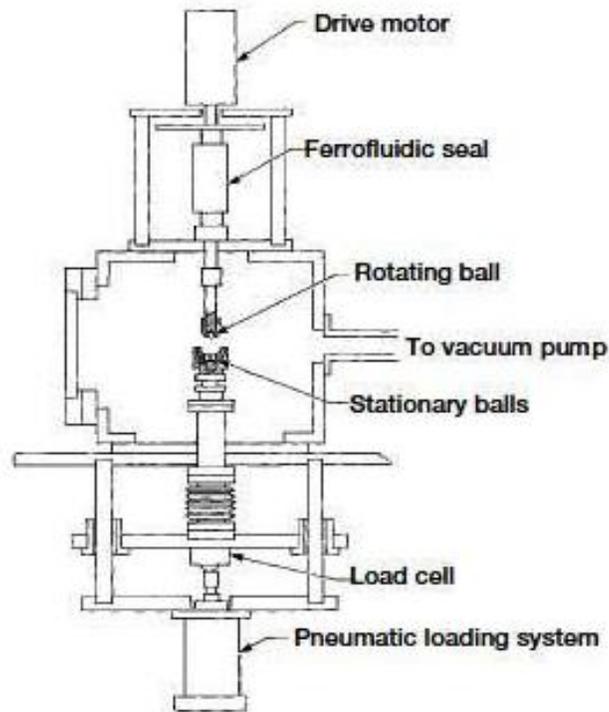


Fig. 11 Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de cuatro bolas en vacío

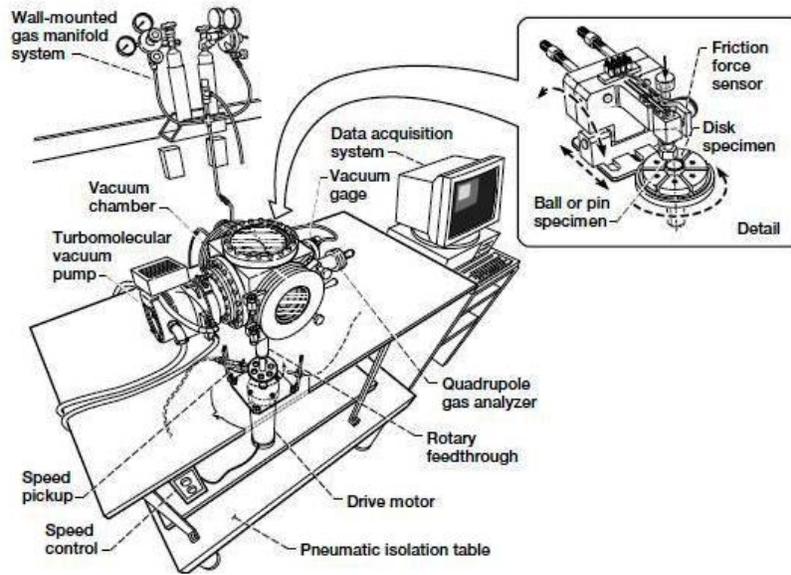


Fig. 12 Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Pin- on - Disk al vacío

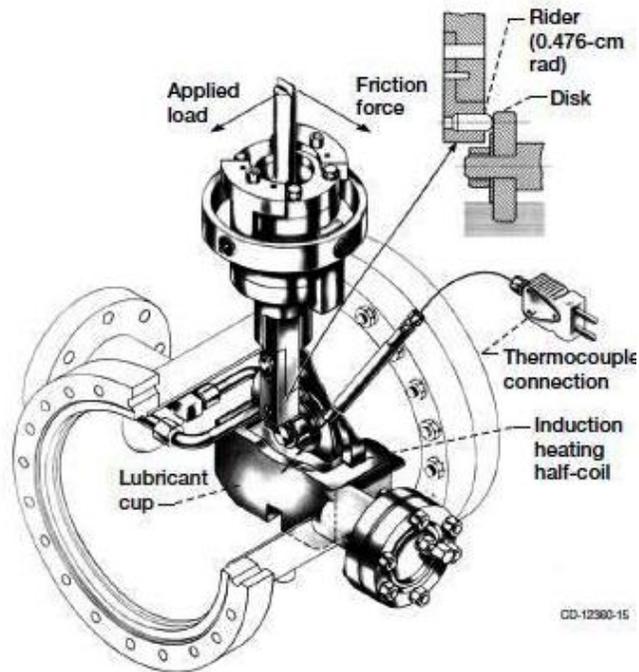


Fig. 13 Vista esquemática de un tribómetro basado en la técnica de Pin-on-Disk

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

El diseño y construcción de cualquier mecanismo, se basa en herramientas teóricas, las cuales proporciona tanto guía para realizar los diferentes procesos, como una aproximación al comportamiento del mismo. En este capítulo, se presentan los conceptos en los cuales el diseño, construcción y puesta en marcha de una máquina tribológica basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas.

3.1. Tribología

La palabra tribología, se deriva del griego “tribos = rozamiento o fricción” y “logos = estudio o tratado”. Por ello, se le puede definir como el estudio o tratado de los fenómenos de la frotación o fricción. Sin embargo, un grupo de Científicos del Ministerio Británico de Ciencia y Educación encabezada por el profesor Peter Jost, la definió como: “La ciencia y tecnología que estudia los cuerpos que se encuentran en contacto y movimiento relativo, así como los fenómenos que de ello se derivan”. En consecuencia, la fricción, el desgaste, y la lubricación son áreas de estudio para esta ciencia (20).

El estudio de la tribología, está apoyada por diferentes ciencias como se ejemplifica en la Fig. 14:

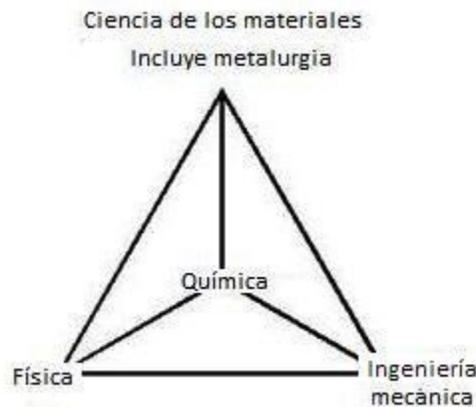


Fig. 14 Ciencias que apoyan a la tribología

Mientras que la aplicación de estas ciencias en la ingeniería mecánica se muestran en la siguiente Fig. 15:

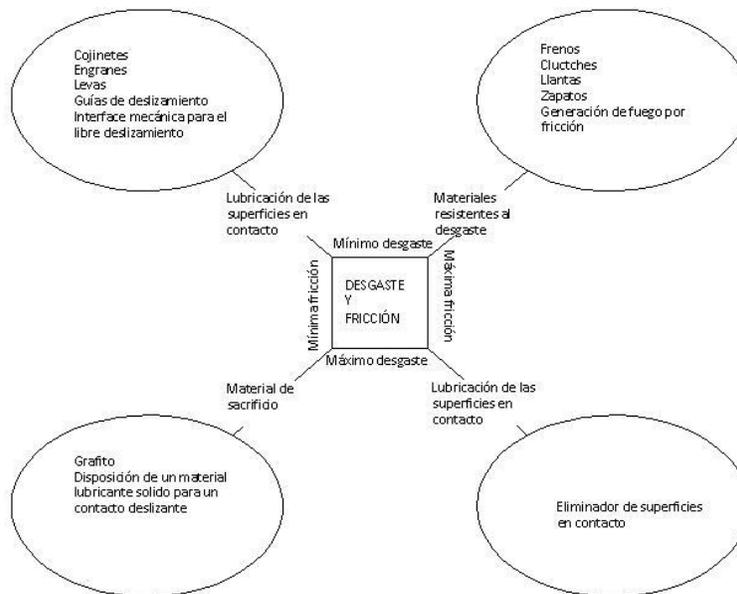


Fig. 15 Objetivos prácticos de la tribología

Un tribosistema, se define como las condiciones en las que se lleva a cabo la interacción de las superficies de los pares mecánicos, así como su entorno mostrado en la Fig. 16:

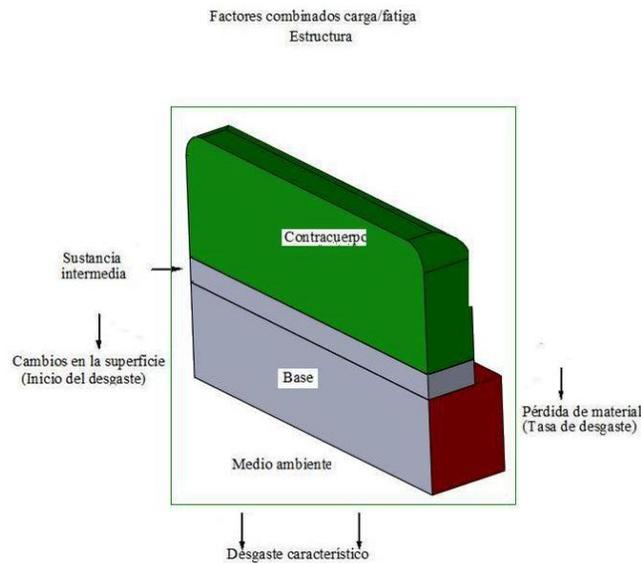


Fig. 16 Tribosistema.

Base: Cuerpo primario de fricción, en condición de desgaste.

Contracuerpo: Cuerpo secundario de fricción bajo condiciones de desgaste.

Sustancia intermedia: Aceite lubricante, polvo, fibras, granos, agua, vapor, gases, etcétera.

Medio ambiente: Es el entorno donde se encuentra el sistema; puede estar constituido por gases y/o líquidos en diferentes condiciones de presión; ya sean muy elevadas o al vacío; a temperaturas extremas, etcétera.

Involucrando cualquier posible combinación de triboelementos, que incluyen al medio ambiente (20).

3.1.1. Contacto mecánico

Las altas presiones que se desarrollan en los puntos de contacto individuales conllevan a la extensión de las asperezas o a su penetración. Al analizar el contacto entre dos superficies debe considerarse como requisito normal la presencia de asperezas con distribuciones de alturas al azar. La expansión sufre cambios irreversibles en la forma de las asperezas que se encuentran en contacto y la penetración tiene lugar cuando los cuerpos en contacto tienen diferentes valores de dureza. Cuando una de las superficies transmite un esfuerzo hacia la otra, dichas asperezas pueden sufrir deformaciones elásticas o plásticas como las mostradas en la Fig. 17. La suma de todos los microcontactos que forman las asperezas individuales constituyen el área real de contacto, que representa solamente un fragmento diminuto del área geométrica visible o aparente (20)(21).

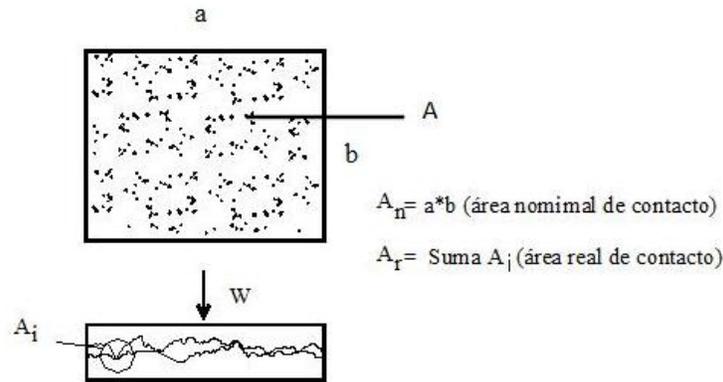


Fig. 17 Área real de contacto

Existen dos grupos de propiedades que determinan el área real de contacto.

- La deformación mecánica que incluye: El módulo elástico, E ; la presión de cedencia, P_y y la dureza, H .
- Las características topográficas de los materiales, cuyos parámetros más importantes son: La distribución de asperezas, el radio de cresta de las asperezas:
 - (β)= Desviación estándar de alturas de las asperezas
 - (σ)= La pendiente de la aspereza
 - (θ)= Generalmente, el comportamiento de los materiales en contacto está determinado por, el índice de plasticidad
 - (Ψ)= Definido por la (20)(21):

$$\Psi = \frac{E}{P_y} \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si el índice de plasticidad es $\Psi < 0.6$, entonces el contacto se clasifica como elástico. En caso de que $\Psi > 1.0$, la deformación predominante en la zona de contacto, se denomina plástica, Entonces, cuando $0.6 < \Psi < 1$ hay algo de deformación plástica y elástica.

3.1.1.1. Contacto entre superficies

Cuando dos superficies nominalmente planas y paralelas se colocan cuidadosamente juntas, el contacto ocurrirá solamente en algunos puntos. Como la carga normal es incrementada, las superficies se acercan y se incrementa el número de áreas o asperezas en las dos superficies que entran en contacto.

Desde esas asperezas proporciona los puntos en las que las superficies entran en contacto, estas son responsables de soportar la carga normal aplicada en las superficies o la generación de de cualquier fuerza de fricción presente entre ellas.

Con la mayoría de los materiales las curvas de esfuerzo deformación cambian su pendiente de forma estrepitosa, pero no discontinua, llegando a ser casi horizontal. Para la mayoría de los objetivos es necesario un parámetro el cual represente la deformación cerca del parte horizontal de la curva, para esto los parámetros más usados son, estos se observan en la Fig. 18:

- El limite proporcional
- El limite elástico
- Punto de cedencia (0.2%)

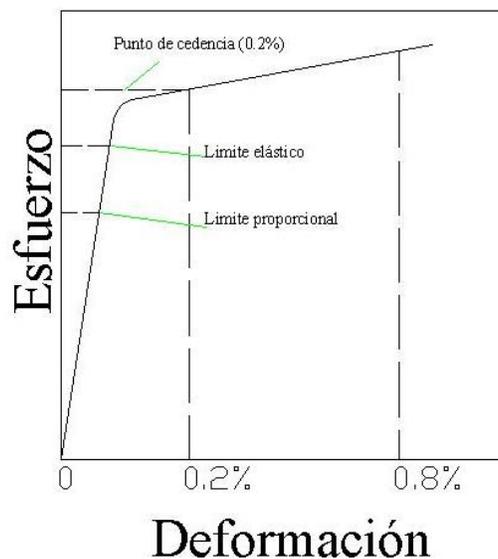


Fig. 18 Diagrama esfuerzo deformación

Deformación de una sola aspereza

Después de examinar el comportamiento de dos superficies rugosas en contacto, en cada gran número de asperezas de diferentes tamaños y formas presionadas contra otras, se debe de idealizar el caso simple de una sola aspereza cargada contra una superficie plana. Para

realizar este estudio es necesario modelar las asperezas con una forma esférica, cónica o piramidal.

3.1.1.2. Deformación elástica

Cuando una esfera de un material elástico es presionada contra una superficie plana como se ejemplifica en la Fig. 19, bajo una carga normal w , el contacto ocurrirá entre dos áreas circulares de radio a , definida por la siguiente ecuación (Hertz 1881):

$$a = \left(\frac{3\omega r}{4E} \right)^{1/3}$$

2

Donde:

r = Radio de la esfera

E = Modulo de elasticidad del material

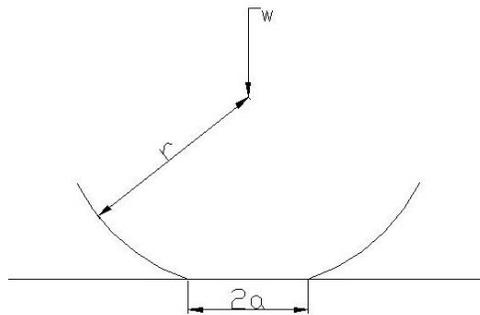


Fig. 19 Deformación elástica presente en el contacto de una esfera de radio r , presionada contra una superficie plana. Bajo una carga w

El esfuerzo mostrado en este contacto, no es uniforme sobre el área circular en contacto, pero presenta una distribución normal, presentando en el centro el máximo y disminuyendo conforme se aleja de este, llegando hasta un valor de cero ejemplificado en la Fig. 20. El esfuerzo máximo presente en el centro del círculo de contacto, es $3/2$ veces el promedio de la presión.

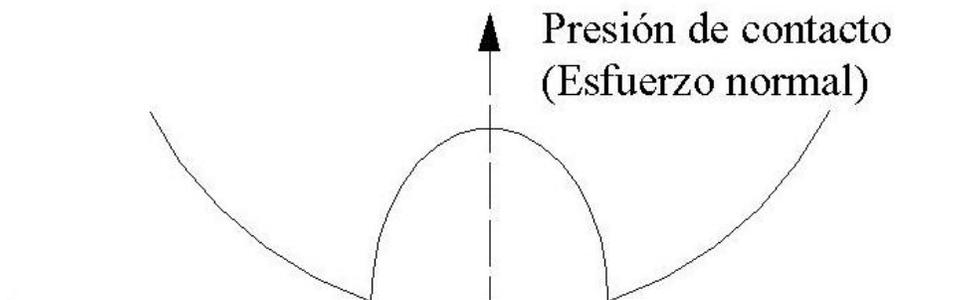


Fig. 20 Distribución del esfuerzo normal de una esfera de material elástico contra una superficie plana

3.1.1.3. Deformación plástica

Como la carga normal entre la esfera y la superficie plana es incrementada, uno u otro de los componentes podrían comenzar a deformarse plásticamente. Esta situación podría simplificarse considerando dos casos:

- Asumir que la esfera es completamente rígida y la deformación plástica es confinada a la superficie plana.
- Que la deformación solo se presenta en la esfera y que la superficie plana está completamente rígida.

Esta deformación se presenta en una región de la curva esfuerzo- deformación, la misma se puede determinar por medio del ensayo experimental el cual consiste en presionar una probeta metálica contra una superficie plana (material al estudiar), la cual deja una marca en el material producida por una carga determinada. La marca dejada por esta prueba es medida y define la dureza del material.

Durante la prueba de compresión, la deformación es uniforme dentro de la región central ya que la deformación varía dependiendo del punto en cual la geometría de la región deformada. La marca producida por el ensayo de dureza mostrado en la Fig. 21 y Fig. 23, es uno de los principales ensayos para un material sometido a condiciones de fricción y deformación. Esto parte del hecho que una interacción de una típica superficie, en donde una superficie con aristas rugosas es presionada contra otra, es muy similar a la geometría que se presentaría durante la deformación de una prueba de dureza.



Fig. 21 Ensayo Brinell, una esfera de acero es presionada contra una superficie plana, para posteriormente medir el diámetro de la marca

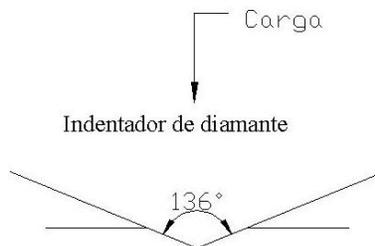


Fig. 22 Ensayo Vickers, en este ensayo se presiona un indentador de forma cuadrada, piramidal con punta de diamante a una superficie plana y las diagonales generadas son medidas.

3.1.2. Fricción

La fricción se presenta entre cuerpos en deslizamiento, provocando consumo de energía debido al contacto de las superficies.

La palabra fricción, viene del latín “*fricare*”, que significa rozamiento. La fricción se ha definido como la fuerza de resistencia tangencial en la interacción de dos cuerpos, cuando están bajo la acción de una fuerza externa y uno de ellos se mueve o tiende a moverse, relativamente, sobre la superficie del otro. Dependiendo de las características de los elementos en contacto podemos definir a la fricción como:

- Fricción aerodinámica: Gas y un sólido
- Fricción líquida o fluida: Líquido y un sólido (no solo depende del gradiente de velocidad, sino también de la viscosidad del fluido)
- Fricción sólida o seca: Entre sólidos
- Fricción interna: Entre las moléculas de un mismo cuerpo esto se debe a la deformación tanto elástica como plástica del material (22).

De acuerdo con la 1ra ley de la termodinámica “*El trabajo realizado por la fuerza de fricción es igual a la suma del cambio de energía interna y la energía disipada*” (23).

Al igual que las características del material, el movimiento al cual están sometidos los elementos en contacto, nos definen el tipo de fricción presente entre ellos los mostrados en la Fig. 23:

- Fricción deslizante: Si las condiciones de contacto entre dos elementos sólidos, permiten el movimiento y ninguno de ellos presenta una forma la cual permita su giro, presentara un deslizamiento.
- Fricción rodante: Cuando uno de ellos tenga una forma que permita el giro, también se presentara un ligero deslizamiento en las áreas de contacto.



Fig. 23 Fricción deslizante y Fricción rodante

Son muchos los factores que intervienen en la generación de la fuerza de fricción; y no únicamente las propiedades de los materiales; también, las condiciones de operación, la rugosidad superficial, la presencia o ausencia de óxidos o películas absorbidas, entre otras. Es decir, tiene una doble naturaleza, molecular y mecánica; determinada por la deformación del material y por la formación de las uniones entre asperezas en contacto (22).

Entre la fuerza de fricción y la carga normal, existe una relación constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de fricción, denotada por:

$$\mu = F/W$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción.

F= Fuerza Aplicada.

W= Carga Normal.

3.1.2.1. Coeficiente de fricción

Los eventos microscópicos, ya sean físicos, químicos o su combinación; que generan la fricción, se llaman mecanismos básicos de fricción. Los fenómenos microscópicos involucrados en la generación de la fricción son: adhesión, rayado de la superficie por las asperezas, deformación y/o fractura de las capas superficiales, e interferencia o deformación plástica local causada por terceros cuerpos, ejemplificada en la Fig. 24 (24).

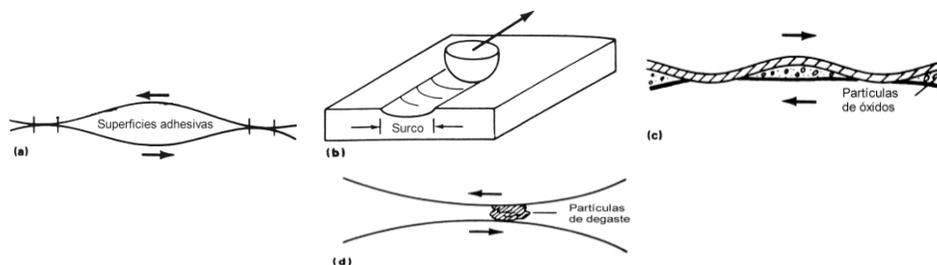


Fig. 24. Mecanismos microscópicos de fricción. a) Adhesión; b) Rayado; c) Presencia de óxidos; d) Terceros cuerpos.

El coeficiente de fricción no es una propiedad simple, algunos de los factores que lo afectan son (25):

- Cinemática de las superficies en contacto
- Cargas y/o desplazamientos externos.
- Condiciones del medio.
- Topografía superficial.
- Propiedades de los materiales.

Debe recordarse que el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

3.1.3. Desgaste

Una de las consecuencias del proceso de interacción entre superficies sólidas en movimiento relativo, ya sea deslizante o rodante; es la gradual remoción de material, lo cual es conocido como “*desgaste*”. es considerado como un fenómeno tribológico, que se presenta cuando un material es removido o indeseablemente desplazado por el efecto que se produce entre superficies que se encuentran sometidas a una carga, en contacto y en movimiento relativo (26). Este movimiento puede ser en una o dos direcciones, ya sea deslizando o de manera rodante, existiendo la posibilidad de que se presente una combinación de los dos últimos movimientos.

El desgaste ocasiona pérdidas de material en la superficie de los elementos en contacto, generando que estos sufran cambios irreversibles en sus propiedades mecánicas. Esto

perjudica enormemente el funcionamiento correcto tanto de los sistemas mecánicos como de sus componentes.

Algunos factores considerados en el desgaste son (21):

- El volumen del material en el contacto deslizante y varía de acuerdo a la presión, la rugosidad de la superficie en rozamiento y la presencia de películas en la superficie.
- El contacto real entre sólidos es discreto y se deforman micror volúmenes del material, para los cuales hablando estrictamente la hipótesis de cuerpos homogéneos isotrópicos usada en la mecánica clásica de los cuerpos deformables, es inaplicable.
- En contraste con los cálculos de la resistencia (donde los cuerpos no se fracturan), en los de desgaste, es esencial conocer las condiciones del proceso de fractura.
- Las propiedades de los materiales que toman parte en el deslizamiento, difieren frecuentemente de los materiales originales, ya que esa varía durante el proceso, de forma tal que las condiciones de fractura también son modificadas.

3.1.3.1. Proceso de desgaste

El comportamiento del desgaste de los materiales es un fenómeno muy complejo. El material de una superficie sólida puede ser removido por tres mecanismos: fusión, disolución química o separación física de átomos; que finalmente, causan un daño a la superficie. Los daños superficiales, se definen como los cambios topográficos, microestructurales o su combinación, de la capa superficial.

La magnitud del desgaste por lo general es valorada por la disminución en el volumen del cuerpo en una dirección perpendicular a la superficie de deslizamiento. Una de sus representaciones es la basada en función del tiempo de operación, puede identificar tres etapas del proceso definido en la Fig. 25:

1. Etapa de asentamiento: Es una etapa de no equilibrio del proceso que sigue una función exponencial y representa una pequeña porción del tiempo total de operación del par deslizante, se caracteriza por un régimen específico de desgaste dW/dL_f (donde W es el desgaste y L_f es la trayectoria de la fricción) que disminuye con el tiempo durante el deslizamiento.
2. Etapa del proceso: Está etapa, se caracteriza por ser la de un periodo temporal más largo, e caracteriza por valores constantes en el régimen de desgaste, por lo que sigue una función lineal:
($dW/(dL_f) = Cont$).

4

3. Etapa de desgaste catastrófico: Se caracteriza por un régimen de desgaste en incremento constante y no es aplicable a las superficies en rozamiento. El desgaste tiene lugar en partes de la superficie donde hay un fuerte interacción entre los

cuerpos en rozamiento (en los enlaces de las asperezas), que al sumarse dan como resultado el área real de contacto entre dos cuerpos.

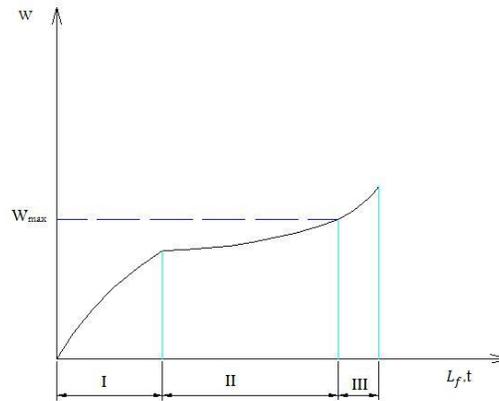


Fig. 25 Desgaste W en función del tiempo de operación

3.1.3.2. Tipos de desgaste

Según sea el tipo de movimiento o de interacción entre los materiales sometidos a carga, una modelación idealizada de los tipos de desgaste se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7 Tipos de desgaste

ESQUEMA	DESCRIPCIÓN
<i>Daños superficiales sin intercambio de material</i>	
	Cambios estructurales. Daños por cambio en la micro-estructura; por ejemplo, por envejecimiento, templado, transformaciones de fase, re-cristalización, entre otros.
	Deformación plástica. Daño caracterizado por la presencia de deformación residual en la capa superficial, tanto localizada como en extenso. Incluso, con frecuencia se presenta cambio de forma.
	Fractura superficial. Daño causado por la extensión de deformaciones de contactos locales o variaciones por deformaciones térmicas o mecánicas cíclicas.
<i>Daños superficiales con pérdida de material.</i>	
	Pérdida de material de la superficie, dejando vacíos de diferentes formas y tamaños. Los procesos fundamentales de remoción de material son: fractura, corte, extrusión, formación de virutas, rayado, fractura frágil, fractura por fatiga, disolución química y difusión.
<i>Daños superficiales con adhesión de material</i>	
	Se adhieren a la superficie partículas de desgaste. Principalmente, es la transferencia de material desprendido de la contra-superficie; pero, también pueden ser partículas contaminantes.
	Corrosión: Degradación del material por reacciones químicas con elementos del ambiente o elementos de la contra-superficie.

De acuerdo a Burwell el desgaste se puede clasificar de la siguiente manera (21):

- Desgaste adhesivo
- Desgaste abrasivo
- Desgaste por fatiga
- Desgaste corrosivo

A los que denomino mecanismos mayores de desgaste. Asimismo; también se determinaron los mecanismos menores de desgaste como:

- Erosión
- Cavitación

3.1.4. Lubricación

La lubricación implica la introducción de un gas, líquido o sólido entre la interfaz de deslizamiento de dos sólidos, para reducir la fricción y el desgaste, así como disipar el calor y remover los residuos que se generan durante el proceso de desgaste (27).

El desarrollo de lubricantes ha llega a ser una parte integral del desarrollo de maquinaria y su tecnología. Es indiscutible la relación que guarda con diferentes campos de estudio, ya que sin estos lasos, el desarrollo de nuevos lubricantes podría fallar en su objetivo.

La lubricación es junto con el desgaste y la fricción, es parte fundamental de la ciencia de la tribología.

Son muy diversos los tipos de materiales que pueden utilizarse como lubricante, es por ello que de forma general se agrupan, de acuerdo con su estado físico se clasifican como (21):

- Lubricantes gaseosos
- Lubricantes líquidos
- Lubricantes semisólidos
- Lubricantes sólidos

3.1.4.1. Lubricantes líquidos

Son aquéllos a los que por sus características de fluidez, se les designa como aceites lubricantes. Dentro de estos están los aceites simples y compuestos.

Los aceites simples por su origen, se agrupan como:

- Aceites minerales
- Aceites animales
- Aceites vegetales
- Aceites sintéticos

Los aceites compuestos se obtienen a partir de mezclas de aceites simples y de la adición de muy variados componentes químicos denominados aditivos.

Para determinar la capacidad de los aceites, es necesario referirse a sus principales características de funcionamiento, como son:

Viscosidad: Es el índice más importante de los aceites; ella determina la tolerancia a la carga de la película lubricante en los pares de fricción de los elementos en contacto. La viscosidad de un fluido se define, como el frotamiento interno entre las moléculas del fluido, al deslizarse unas respecto a otras, bajo la acción de una fuerza externa.

La primera hipótesis desarrollada sobre la fuerza necesaria para romper la resistencia viscosa de un fluido, fue desarrollada por Isaac Newton (Ley de viscosidad de Newton, 1668). La cual establece “La fuerza de cizallamiento por unidad de área, es proporcional al gradiente de velocidad local negativo” esto se representa gráficamente como se muestra en la Fig. 26(21).

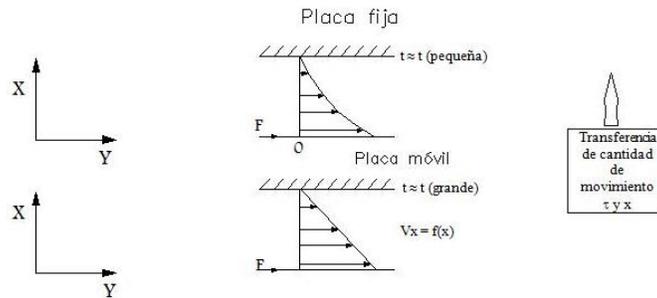


Fig. 26 Ley de viscosidad de Newton

$$\tau_{xy} = -\eta \frac{dV_x}{dy}$$

5

Donde:

τ_{xy} : Esfuerzo cortante (Transferencia de cantidad de movimiento de origen molecular), variación de cantidad de movimiento por unidad de área y unidad de tiempo

dV_x : Gradiente de velocidad

dy : Coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica

Todos los fluidos que cumplen con la con la ecuación son denominados “Fluidos newtonianos”, tales como amoniaco, alcohol, petróleo, cloroformo, butano, etcétera.

Los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación son “no newtonianos”. Estrictamente hablando la definición de un fluido

es válida solo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

Las dimensiones de la viscosidad dinámica se expresan en Poise (P) o centipoise (CP), también puede expresarse en unidades de viscosidad cinemática, que representa la viscosidad dinámica de un fluido respecto a su densidad a la misma temperatura y presión atmosférica

$$\eta = \rho v$$

6

Donde:

η : Viscosidad dinámica

ρ : Densidad, g/cm³

v = Viscosidad relativa, CS (mm²/s)

El factor más importante en la viscosidad es la temperatura, ya que los aceites lubricantes con base en hidrocarburos se caracterizan por presentar cambios rápidos de viscosidad con los cambios de temperatura.

Las características de un lubricante se basan en los conceptos de:

- Densidad
- Propiedad anti-desgaste
- Propiedades térmicas de los lubricantes
- Dilatación volumétrica:
- Estabilidad
- Corrosividad

3.1.4.2. Lubricantes compuestos

Casi la totalidad de los mecanismos modernos exigen para su lubricación productos con una gama de propiedades especiales, mayor a la que puede brindar por sí solos los aceites básicos, de allí que los aceites lubricantes actuales estén elaborados de mezclas entre aceites básicos y aditivos que mejoran y proporcionan las características exigidas al producto terminado.

Aditivos

Son compuestos químicos, predominantemente orgánicos, que pueden mejorar una o varias de las propiedades de los materiales lubricantes. La compatibilidad y sinergia

entre componentes, así como efectividad y economía son las principales características que son todas en cuenta en la selección de un aditivo. De acuerdo con sus propiedades los aditivos se definen como:

- Mejoradores de viscosidad
- Antioxidante y anti corrosivos
- Anti desgaste y de extrema presión
- Detergente-dispersante
- Depresores de fluido
- Anti espumantes

3.1.4.3. Lubricantes semisólidos

Se definen como lubricantes semisólidos a las grasas lubricantes, ya que por sus características, ocupan un lugar intermedio entre los aceites y sólidos lubricantes, ya que poseen cualidades parecidas a ambos materiales.

Por sus características reológicas, las grasas lubricantes, se definen como el material lubricante que bajo la acción de una pequeña carga, en condiciones comunes de temperatura, presenta propiedades de cuerpo sólido, y al alcanzar la carga aplicada adquiere un valor crítico: comienza a deformarse plásticamente hasta fluir igual que un líquido, y recuperar las características de cuerpo sólido al suprimirse la carga.

Una de las principales propiedades que diferencian a la grasa de un aceite, es que la viscosidad de estas no está regida por la ley de viscosidad de Newton, ya que está depende no solo de la temperatura, sino también de la velocidad de deformación.

Las grasas constan de una estructura formada por partículas sólidas del espesante (fase dispersa) y del aceite (fase dispersante). En la elaboración de las grasas lubricantes, se utilizan sustancias de origen orgánico e inorgánico (5-25%), principalmente jabones, parafinas, silicagel, pigmentos y otros; como medios dispersantes, se utilizan aceites minerales petrolíferos y aceites sintéticos (75-95%). Además de algunos aditivos que le proporcionan las propiedades necesarias para su uso, esto se enlista en la

Tabla 8 (21):

- Mejoradores de la estabilidad ante el agua (polímeros de alto peso molecular)
- Mejoradores del color (polímeros del tipo polisiloxano y otros)
- Mejoradores de la adhesividad (poli-isobutileno, latex de caucho natural, etcétera)
- Mejoradores de las propiedades de viscosidad
- Antiespumantes

Tabla 8 Clasificación de las grasas dependiendo de su aplicación

Grasa	Descripción
Grasa de uso genera	De jabón de calcio hidratado para temperaturas de trabajo máximas de 65-70°C
Grasa de uso general para temperaturas medias	Grasas de base sodio y sodio-calcio para temperaturas de trabajo superiores 70° y hasta 110 °C
Grasas de uso múltiple	Son resistentes al agua y capaces de trabajar en amplio rango de velocidades, temperaturas y cargas. Son aplicadas en la mayoría de las superficies de trabajo
Grasas de alta temperatura	Para elaborarse se emplean jabones de sodio, complejo calcio, complejo aluminio, grafito coloidal y pigmentos. Su rango de temperatura de trabajo puede ser hasta de 250°C.
Grasas de baja temperatura	Se elaboran a partir de sebos naturales o de hidrocarburos sólidos, son especialmente diseñados para trabajar a temperaturas de hasta -50°C
Grasas para instrumentos	En su elaboración se emplean jabones de litio, sodio, complejo calcio y cerecinas. Como base dispersante se utilizan diversos tipos de aceites minerales y sintéticos.
Grasas resistentes a medio agresivo	Se elaboran de hidrocarburos altamente refinados, fluorocarbonadas y de silicagel.
Grasas de ferrocarril	Elaborado con un alto contenido de espesante de jabón de sodio (hasta 40%)
Grasas protectoras	Son grasas hidrocarbonadas, obtenidas de a partir de parafinas, aceites residuales y la mezcla de ambos. Son insolubles al agua, cuentan con una alta estabilidad coloidal con alta resistencia a la oxidación y baja evaporabilidad.

3.1.4.4. Regímenes de lubricación

La fricción, el desgaste y el daño de una superficie que se encuentra en contacto con otra, puede ser reducido si se introducen entre ellos un lubricante. Esto, con el fin de separar total o parcialmente las superficies en contacto, esto reduce la fuerza tangencial que se genera por el contacto y rompimiento de las asperezas.

La lubricación se presenta de diversas formas, esto depende del contacto relativo que se encuentra entre las superficies en contacto. El uso de gases o líquidos lubricantes se denomina lubricación por película de fluido como se muestra en la Fig. 27.

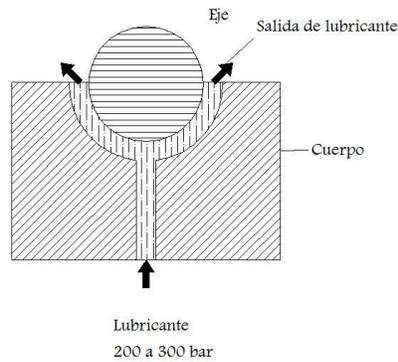


Fig. 27 Lubricación por fluido

La lubricación puede ser definida como se muestra brevemente:

- Lubricación de película gruesa

Cuando el espesor de la película lubricante es mucho mayor que el tamaño molecular del lubricante, se conoce como película lubricante gruesa, Fig. 28.

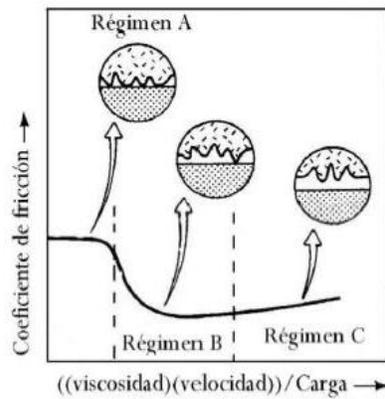


Fig. 28 Curvas de Stribeck

Las curvas de Stribeck, presentan los tres regímenes de lubricación existentes entre dos superficies actuantes y un elemento lubricante entre ellas, esto no lo muestra mediante la variación del coeficiente de fricción y las características presentes en el tribosistema (viscosidad, velocidad y carga). EL régimen A y B, se presentan en lubricación con película delgada y el régimen C con película lubricante gruesa (22).

Stribeck, encontró que la dependencia del coeficiente de fricción (μ) manifestado por los parámetros de lubricación

$$\eta V/P$$

Donde

η – Viscosidad del lubricante

V – Velocidad

P- Presión promedio de contacto

- Lubricación de película delgada

Se dice que el régimen de lubricación de capa o película delgada, es el resultado de la combinación de lubricación hidrodinámica y lubricación elastohidrodinámica. Esta se presenta en los límites donde la presión del lubricante soporta completamente la carga y donde la carga es completamente soportada por las asperezas en contacto, se presentan algunas veces, la lubricación de capa delgada de contactos concentrados. En estos casos, la carga es soportada tanto por la presión hidrodinámica del lubricante, como por la presión de las asperezas en contacto.

La integridad tribológica de la lubricación de capa delgada, depende del grado de protección que se les puede brindar a las asperezas, es decir, de grado en que pueden ser protegidas por un lubricante, Fig. 29.

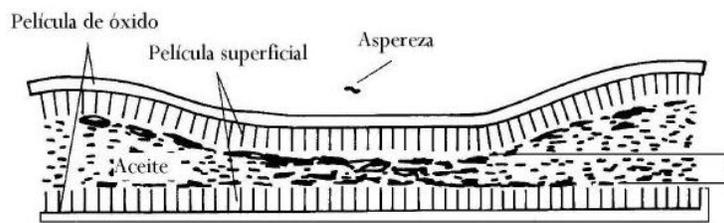


Fig. 29 Película lubricante (22)

- Lubricación de capa límite

Se presenta en sistemas de baja velocidad. Se muestra donde la dimensión de la capa lubricante es pequeña en extremo. Protege a la superficie, previniendo que la tasa de desgaste dañe a las superficies en contacto. Generalmente se manifiesta cuando existen grandes presiones de contacto, baja velocidad de deslizamiento y las fuerzas hidrodinámicas son insuficientes para mantener una película delgada de lubricación entre las superficies en deslizamiento Fig. 30.

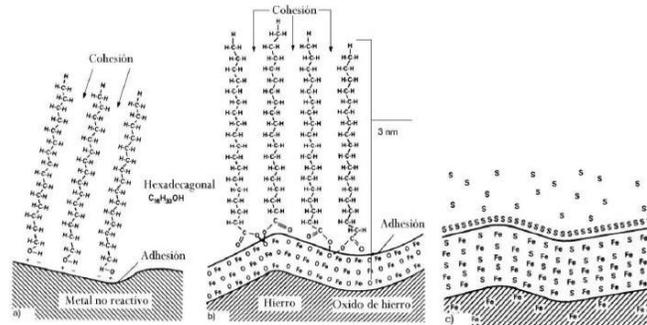


Fig. 30 Lubricación límite o de frontera

3.2. Control

El funcionamiento de un sistema depende de las características e interacciones entre sus elementos. Se denomina Sistema de Control a aquel sistema constituido por un conjunto de elementos conectados de forma que permiten regular o gobernar otro sistema, denominado planta o proceso, este se muestra en la Fig. 31 (28).

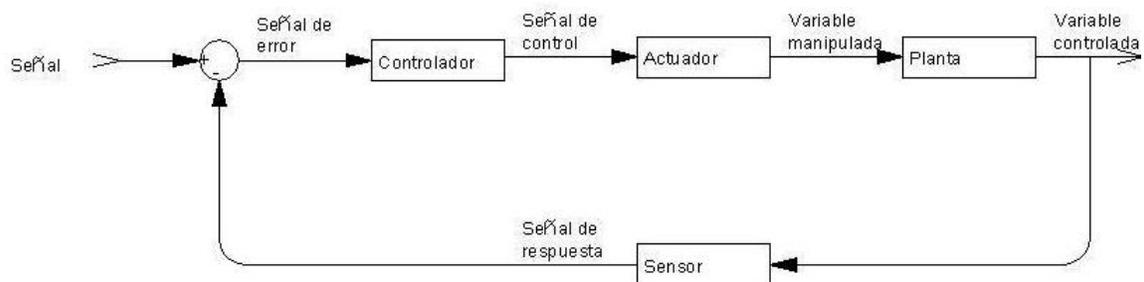


Fig. 31 Sistema de control de lazo cerrado

Todos los sistemas de control se componen de cinco elementos básicos, cuyo estudio contribuye al mejorar las prestaciones de la planta o control:

- Sensor
- Transmisor
- Controlador
- Actuador
- Planta o proceso

Para el estudio formal de un sistema, es necesaria una representación matemática del mismo, en el caso de sistemas lineales, la simplicidad del modelado “entrada – salida” por función de transferencia o transmitancia lo convierte en el más usual.

En un sistema físico la relación “entrada – salida” puede obtenerse mediante la ecuación diferencial que relaciona la entrada y salida del sistema, suponiendo condiciones iniciales nulas. En general, es un cociente de dos polinomios complejos de variable compleja s:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

8

Esta ecuación se define por la relación entre las transformadas de Laplace de salida y las de entrada del sistema, con $m < n$, la cual cuenta con las siguientes características:

- Polinomio característico de la transmitancia al denominador $G(s)$.
- Ecuación característica al polinomio característico igualado a 0.
- Ceros de la transmisión a las raíces del numerado de $G(s)$.
- Polos a las raíces del denominador.
- Orden del sistema representado por $G(s)$ al número de polos.
- Tipo del sistema al número de integrador.

Por conveniencia, se utiliza en lo posible una forma normalizada de la ecuación anterior, la función de transferencia canónica, con los términos independientes de numerado y denominador unitarios, y con los integradores puros aislados:

$$G(s) = \frac{k \cdot (c_m s^m + c_{m-1} s^{m-1} + \dots + c_1 s^1 + 1)}{s^r \cdot (d_m s^m + d_{m-1} s^{m-1} + \dots + d_1 s^1 + 1)}$$

9

de forma que el valor de la ganancia canónica del sistema k , y su tipo r (28).

3.2.1. Señales de un sistema de control

Las señales de entrada y salida son componentes básicos de un sistema. General mente se denominan(28):

- Variable de proceso $y(t)$: Es la señal de salida de la planta (Proceso Variable PV).
- Variable medida $y_m(t)$: Señal enviada del sensor al medir la variable del proceso (Salida Media MV)
- Señal de control $u(t)$: Indica la acción correctora determinada por el elemento controlador (Variable de Control CO).
- Consigna $y_{sp}(t)$: Es la señal de referencia de la variable de proceso (Variable de Referencia, Setpoint SP)
- Error $e(t)$: Indica la discrepancia entre la consigna que se quiere alcanzar o mantener, y la variable de proceso.

46

$$e(t) = y_{sp}(t) - y(t).$$

10

- Perturbación $p(t)$: Es una señal no propia del comportamiento normal de la planta (Ruido $n(t)$).

3.2.2. Sistema de control

Sistema de control de lazo abierto

En el sistema de control en el que la salida del proceso a controlar no afecta a la acción de control, en otras palabras, la salida no se mide ni se retroalimenta para compararla con la entrada. Por lo que requiere un completo conocimiento del proceso a controlar y la garantía del correcto funcionamiento del controlador, que no tiene acceso a la señal de salida del proceso (PV). Este proceso se puede observar en el control llevado por las lavadoras antiguas, ya que estas no importaban las variaciones del sistema, el proceso era el mismo(28)(29)(30).

Por lo tanto para un sistema de control de lazo abierto, la entrada de referencia corresponde a una condición de operación fija. Así, la precisión del sistema depende de la calibración, eso nos dice que en presencia de una perturbación, este sistema no cumple con su función asignada(30).

Sistema de control de lazo cerrado

Con frecuencia se les llama así a los sistemas de alimentación retroalimentados. La señal de error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de retroalimentación (que puede ser la señal de salida o una función de esta señal o una derivada), entra al control para reducir el control y llevar la señal de salida a un valor deseado. El termino Lazo cerrado implica siempre el uso de la acción de control retroalimentado para reducir el error del sistema(30).

Este sistema es el mecanismo básico que se utiliza en los procesos, ya sean mecánicos, eléctricos o biológicos, para mantener su equilibrio. A nivel físico, entre el controlador y el proceso ha de existir un elemento actuador, por ejemplo una válvula que ejecute la tarea indicada por el controlado sobre la planta o proceso (28).

Servosistema

Se llama servosistema o servomecanismo a un sistema de control retroalimentado en el que la salida es algún elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración.

Sistema de regulación automática

Este es un sistema retroalimentado donde la entrada de referencia o salida deseada son, constantes o varían lentamente en el tiempo, y donde la tarea fundamental es mantener la salida en un valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes.

Sistema de control de proceso

Este sistema, se define, como un sistema de regulación automática en el que la salida es una variable como temperatura, presión, flujo, nivel de líquido o PH, este se ejemplifica en la Fig. 32.

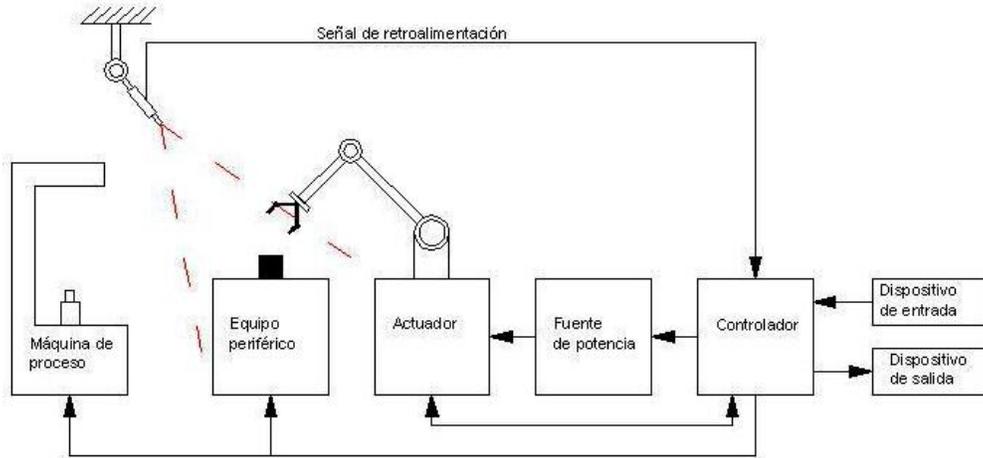


Fig. 32 Robot que utiliza reconocimiento de imagen. Ejemplo sistema de lazo cerrado

3.2.2.1. Conceptos matemáticos de control

Función compleja (30)

Una función compleja $F(s)$, función de s tiene un parte real y una imaginaria:

$$F(s) = F_x + jF_y$$

11

Donde F_x y F_y son condiciones reales. La magnitud de $F(s)$ es $\sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ y el ángulo θ de $F(s)$ es $\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right)$.

Teorema de Euler (30)

Las expansiones en serie de potencias de $\cos\theta$ y $\sen\theta$:

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots$$

12

$$\sen \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots$$

13

Entonces

$$\cos\theta + j\sin\theta = 1 + (j\theta) + \frac{(j\theta)^2}{2!} + \frac{(j\theta)^3}{3!} + \frac{(j\theta)^4}{4!} + \dots$$

14

Como

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

15

Se ve que

$$\cos\theta + j\sin\theta = e^{j\theta}$$

16

La transformada de Laplace (30)

El método de la transformada de Laplace, es un método operacional que puede usarse para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Con el uso de las transformadas de Laplace muchas funciones senoidales, senoidales amortiguadas y exponenciales, se pueden convertir en funciones algebraicas de una variable complejas, y remplazar operaciones como la diferenciación e integración, por operaciones algebraicas en el plano complejo.

Una de las ventajas de las transformadas de Laplace, es que permite utilizar técnicas gráficas para predecir el funcionamiento del sistema sin tener que resolver el sistema de ecuaciones diferenciales.

Se define:

f(t) Función de tiempo t tal que f(t) = 0 para t < 0

s Variable compleja

L Símbolo operativo que indica que la cantidad a la que precede debe transformarse por la integral de Laplace $\int_0^{\infty} e^{-st} dt$

F(s) Transformada de Laplace f(t)

Por lo tanto la transformada de Laplace está dada por:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

17

El proceso inverso de hallar la función de tiempo $f(t)$ de la transformada de Laplace $F(s)$ se denomina transformada inversa de Laplace y se denota L^{-1}

$$\mathcal{L}^{-1} [F(s)] = f(t)$$

18

3.2.2.2. Diagrama de bloques

Un sistema de de control consta de cierta cantidad de componentes. Para mostrar la función que realiza cada componente, se acostumbra a usar diagramas de nominados diagramas de bloques. Un diagrama de bloques es una representación de las funciones realizadas por cada componente y el flujo de las señales. Tal diagrama indica la interrelación que existe entre los diversos componentes (30).

Bloque funcional:

En un símbolo de la operación matemática que el bloque produce a la salida, sobre la señal que tiene a la entrada. Sobre los bloques correspondientes, como la mostrada en Fig. 33, generalmente se colocan las funciones de transferencia de los componentes.

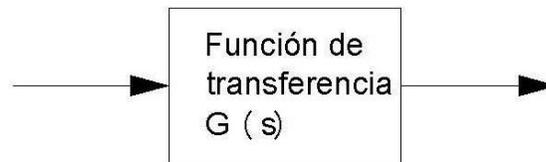


Fig. 33 Bloque funcional

Punto de suma (30):

Este representa ya sea una operación de suma o resta de las señales que entran a este. Es importante que las cantidades a operar tengan las mismas dimensiones y las mismas unidades, mostrada en la Fig. 34.

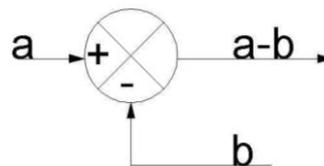


Fig. 34 Punto suma

Punto de bifurcación (30):

Un punto de bifurcación como el mostrado en la Fig. 35, es un punto desde el cual la señal de un bloque va concurrentemente a otro bloque o punto suma.

50

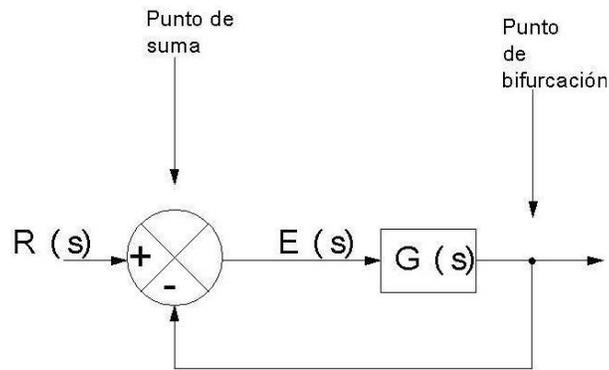


Fig. 35 Diagrama de bloques de lazo cerrado

3.2.3. Modelado y simulación de sistemas

3.2.3.1. Modelado matemático de sistemas

El primer paso para definir un sistema es deducir su modelo matemático. Los modelos matemáticos pueden tener diversas formas, dependiendo del sistema y de las circunstancias particulares.

Es posible realizar un modelo matemático el cual define con una gran precisión un sistema, lo cual elevaría su complejidad. Sin embargo, si no se requiere demasiada precisión, es preferible obtener un modelo matemático razonablemente simplificado.

Sistema mecánico (30):

Sistema mecánico de traslación: Considerando un sistema de masa- resorte- amortiguador montado en un carro, como el esbozado en la Fig. 36:

Un amortiguador es un dispositivo que produce fricción viscosa o amortiguamiento, consiste en un pistón y un cilindro lleno de aceite, cualquier movimiento relativo entre el vástago del pistón y el cilindro encuentra resistencia producida por el aceite, por que este debe fluir alrededor del pistón. Esencialmente el amortiguador absorbe energía, la cual es disipada en forma de calor y no almacena ningún tipo de energía, este se denomina también apagador.

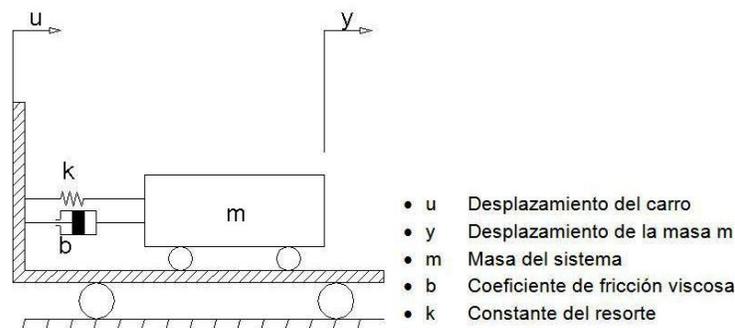


Fig. 36 Sistema de resorte-masa-amortiguador montado en un carro

$$ma = \sum F$$

19

Donde

m Masa, en kg

a Aceleración, en m/s^2

F Fuerza, N

Aplicando la segunda ley de Newton

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -b \left(\frac{dy}{dt} - \frac{du}{dt} \right) - k(y - u)$$

20

Otra forma de representar un modelo matemático de un sistema lineal, es un modelo de función de transferencia.

$$\mathcal{L}\left[m \frac{d^2y}{dt^2}\right] = m[s^2Y(s) - sy(0) - \dot{y}(0)]$$

21

$$\mathcal{L}\left[b \frac{dy}{dt}\right] = b[sY(s) - y(0)]$$

22

$$\mathcal{L}[ky] = kY(s)$$

23

$$\mathcal{L}\left[b \frac{du}{dt}\right] = b[sU(s) - u(0)]$$

24

$$\mathcal{L}[ku] = kU(s)$$

25

Tomando a $Y(s)$ como la salida del sistema y a $U(s)$ como la entrada, la función de transferencia para valores iniciales iguales a 0 es:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{bs + k}{ms^2 + bs + k}$$

26

52

Sistema mecánico rotacional: el sistema consiste en una carga inicial y en un amortiguamiento de fricción viscosa, Fig. 37:

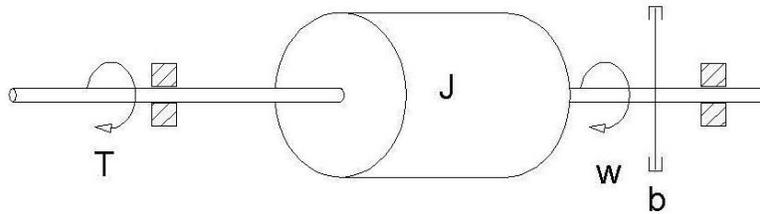


Fig. 37 Sistema mecánico rotacional

$$J \alpha = \sum T$$

27

Donde

- J Momento de inercia de la carga, en $kg - m^2$
- α Aceleración angular de la carga, en rad/s^2
- T Par aplicado al sistema, en N-m

Aplicando la segunda ley de Newton tenemos:

$$j\dot{w} = -bw + T$$

28

Donde

- J Momento de inercia de la carga, en $kg - m^2$
- b Coeficiente de fricción viscosa, en $\frac{Nm}{rad/s}$
- w Velocidad angular, en rad/s
- T Par, en N-m

El modulo en la función de transferencia se puede determinar cómo:

$$\frac{\Omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{js + b}$$

29

Donde

$$\Omega(s) = \mathcal{L}[w(t)] \text{ y } T(s) = \mathcal{L}[T(t)]$$

30

Sistema eléctrico(30):

Las leyes básicas que rigen los circuitos eléctricos son las leyes de voltaje y corriente de Kirchoff. La ley de corrientes, establece que la suma algebraica de todas las corrientes que

53

entran y salen de un nodo, es cero (ley de nodos). La ley de voltaje o tensión, establece que en cualquier instante, la suma algebraica de las tensiones a lo largo de una malla en un circuito eléctrico es igual a cero (ley de mallas o lazos). Aplicando estas leyes a cualquier circuito eléctrico, se puede obtener un modelo matemático del mismo.

Circuito L-R-C: el circuito consiste en una inductancia L (henry), una resistencia R (ohm), y una capacitancia C (farad), Fig. 38.

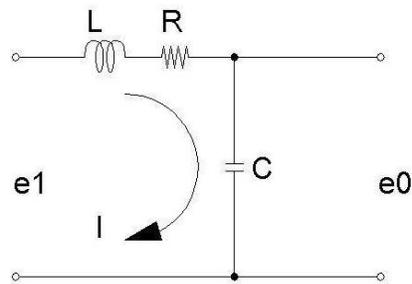


Fig. 38 Circuito eléctrico

Aplicando la ley de tensión de Kirchhoff:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = e_i \quad 31$$

$$\frac{1}{C} \int idt = e_0 \quad 32$$

También se puede obtener el modelo matemático mediante la ecuación de transferencia como:

$$LsI(s) + RI(s) + \frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s) = E_i(s) \quad 33$$

$$\frac{1}{C} \frac{1}{s} I(s) = E_0(s) \quad 34$$

$$G(s) = \frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad 35$$

Si se le aplica a la ecuación de transferencia, la definición de inductancias complejas tenemos que:

$$G(s) = \frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)}$$

36

Sistemas análogos (30):

Se denominan sistemas análogos, a los sistemas que pueden modelarse matemáticamente de forma similar, pero con representación física diferente, un sistema análogo cuenta con las siguientes ventajas:

1. La solución que describe un sistema físico se puede aplicar directamente a sistemas análogos de otro campo.
2. Un tipo de sistema puede ser facilitarse más su estudio que otro.

Analogía mecánica- eléctrica: Los sistemas mecánicos se pueden estudiar a través de sus análogos eléctricos, las cuales se enlistan en la Tabla 9. Existen dos analogías:

- Analogía fuerza- voltaje, Fig. 39:

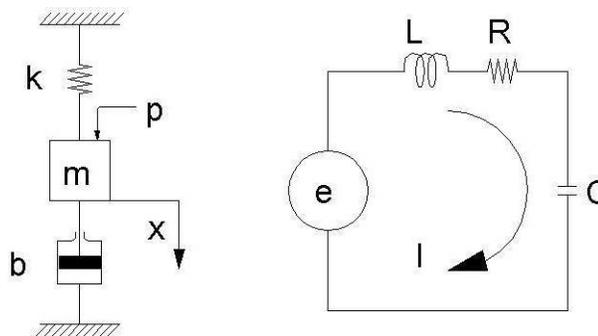


Fig. 39 Sistema mecánico y eléctrico análogo (Fuerza - Voltaje)

Modelo matemático del sistema mecánico:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = p$$

37

Expresión del sistema eléctrico en términos de la carga eléctrica q:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = e$$

38

Tabla 9 Analogía fuerza - voltaje

Sistemas Mecánicos	Sistemas eléctricos
Fuerza p (par T)	Voltaje e
Masa m (momento de inercia J)	Inductancia L
Coefficiente de fricción viscosa b	Resistencia R
Constante del resorte k	Reciproco de capacitancia $\frac{1}{C}$
Desplazamiento x (desplazamiento angular θ)	Carga q
Velocidad \dot{x} (velocidad angular $\dot{\theta}$)	Corriente i

- Analogía fuerza - corriente, Fig. 40:

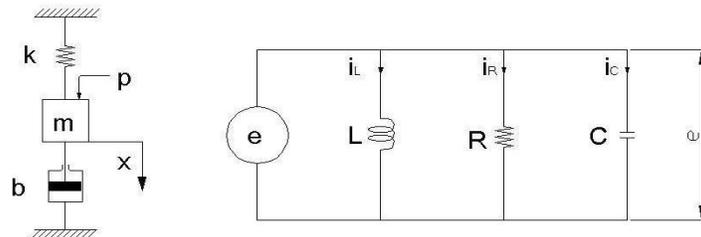


Fig. 40 Sistema mecánico y sistema eléctrico (fuerza - corriente)

Para expresar el sistema mecánico se utiliza el modelo anterior, y para el modelo matemático del circuito se utilizara el flujo magnético (Ψ), con su relación al voltaje y especificado en la Tabla 10:

$$C \frac{d^2\Psi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt} + \frac{1}{L} \Psi = i_s$$

39

Tabla 10 Analogía Fuerza – Corriente

Sistemas Mecánicos	Sistemas eléctricos
Fuerza p (par T)	Corriente i
Masa m (momento de inercia J)	Capacitancia C
Coefficiente de fricción viscosa b	Reciproco de resistencia $\frac{1}{R}$
Constante del resorte k	Reciproco de inductancia $\frac{1}{L}$
Desplazamiento x (desplazamiento angular θ)	Enlace del flujo magnético Ψ
Velocidad \dot{x} (velocidad angular $\dot{\theta}$)	Voltaje E

Sistema electromecánico (30):

Control de armadura con servomotores de cd, Fig. 41, especificando el diagrama de estado y función de transferencia mostrados en la Fig. 42 y Fig. 43:

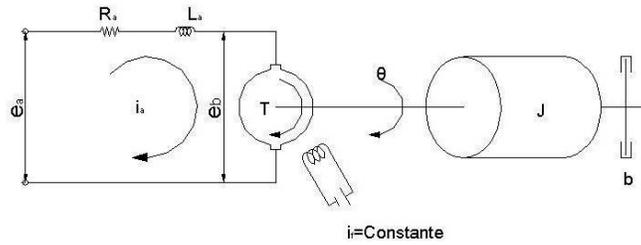


Fig. 41 Circuito eléctrico de un motor cd con control de armadura

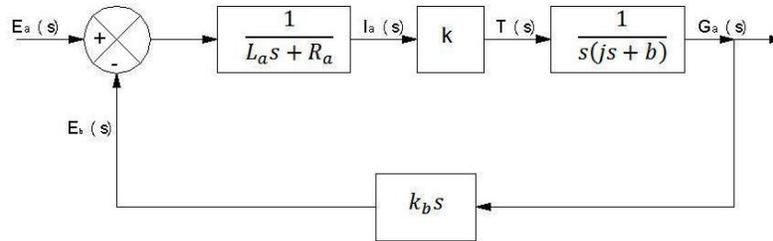


Fig. 42 Diagrama de bloques para un motor cd con control de armadura

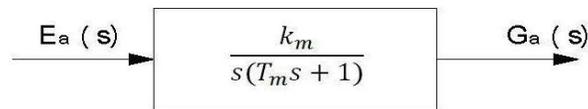


Fig. 43 Función de transferencia de un motor cd con control de armadura

- R_a Resistencia de la armadura, en ohm
- L_a Inductancia de la armadura, en henrios
- i_a Corriente en la armadura, en amperes
- i_f Corriente del campo, en amperes
- e_a Tensión aplicada a la armadura, en volts
- e_b Fuerza contra – electromotriz, en volts
- θ Desplazamiento angular del eje del motor, en radianes
- T Par desarrollado por el motor, en Newton - metro
- J Momento de inercia equivalente del motor y carga con referencia al eje del motor, en $\text{kg} - \text{m}^2$
- b Coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y carga referido al eje del motor, en $\frac{\text{N-m}}{\text{red/seg}}$

Sistema de nivel de líquido (30):

Para analizar el sistema que define el flujo de un fluido, mostrado en la Fig. 44, es necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo a la magnitud del número de Reynolds.

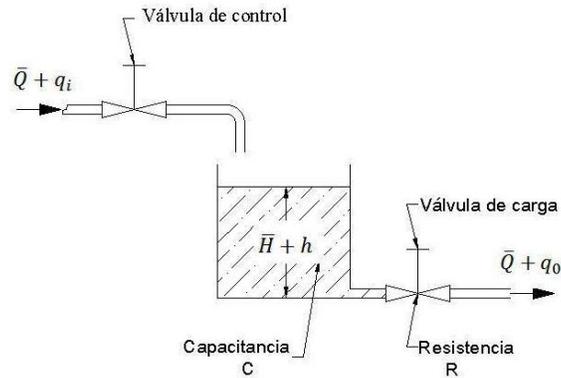


Fig. 44 Sistema de control de líquido

La resistencia (R) al flujo del líquido se define como:

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de niveles, en m}}{\text{Cambio en el gasto, en m}^3/\text{s}}$$

40

La capacitancia (C) de un tanque se define como:

$$C = \frac{\text{Cambio en la cantidad de líquido acumulado, en m}^3}{\text{Cambio en el nivel, en m}}$$

41

Dado que:

\bar{Q} Gasto en el estado estacionario, m^3/s

q_i Variación en el gasto de entrada respecto a su valor de estado estacionario, m^3/s

q_o Variación del gasto de salida respecto a su valor de estado estacionario, m^3/s

\bar{H} Nivel de carga en estado estacionario, en m

h Variación de nivel respecto a su valor de estado estacionario, m

con la definición de estas variables, podemos desarrollar el modelo matemático como:

$$Cdh = (q_i - q_0)dt \quad 42$$

En función de la resistencia tenemos:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad 43$$

Donde la función de transferencia es:

$$(RCs + 1)H(s) = RQ_i(s) \quad 44$$

donde

$$H(s) = \mathcal{L}h \quad \text{y} \quad Q_i(s) = \mathcal{L}[q_i] \quad 45$$

Sistema térmico (30):

El sistema térmico son aquellos que comprenden la transferencia o transmisión de calor de una sustancia a otra. Estos pueden ser analizados en términos de la capacitancia y resistencia, aunque la capacitancia y resistencia térmica puedan no representarse como parámetros concentrados, ya que suelen estar distribuidos a lo largo de la sustancia, mostrado en la Fig. 45.

Hay tres medios diferentes en los que el calor fluye de una sustancia a otra:

- Conducción
- Convección
- Radiación

El modelo matemático que define el proceso de convección o conducción es:

$$q = K\Delta\theta \quad 46$$

Donde

q Flujo de calor, en kcal/s

$\Delta\theta$ Diferencia de temperatura, en °C

K Coeficiente térmico, en $\frac{\text{kcal}}{\text{s}^\circ\text{C}}$

Donde el coeficiente K esta dado por:

$$K = \frac{kA}{\Delta X} \quad \text{Para conducción} \quad 47$$

$$K = HA \quad \text{Para convección} \quad 48$$

Donde

k Conductividad térmica, en $\frac{\text{kcal}}{\text{s}^\circ\text{C}}$

A Área normal al flujo de calor, en m^2

ΔX Grosor del conductor, en m

H Coeficiente de convección, $\frac{\text{kcal}}{\text{s}^\circ\text{C}}$

Para transferencia de calor por radiación, e flujo de calor esta dado por:

$$q = K_r(\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad 49$$

Donde

q Flujo de calor, en kcal/s

K_r Coeficiente que depende de la emisión, dimensiones y características de la superficie emisora y de la receptora

θ_1 Temperatura absoluta del emisor, en $^\circ\text{C}$

θ_2 Temperatura absoluta del receptor, en $^\circ\text{C}$

La resistencia térmica R para la transferencia de calor entre dos superficies se define como:

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de temperatura, en } ^\circ\text{C}}{\text{Cambio en el flujo de calor, en } \frac{\text{kcal}}{\text{s}}} \quad 50$$

Para la transferencia de calor por conducción o convección:

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{1}{K} \quad 51$$

Para transferencia de calor por radiación:

$$R = \frac{d\bar{\theta}}{dq} = \frac{1}{4K_r \bar{\theta}^3}$$

52

La capacitancia térmica C se define como:

$$C = \frac{\text{Cambio en el calor almacenado, en kcal}}{\text{Cambio en la temperatura, } ^\circ\text{C}}$$

53

o

$$C = mc_p$$

54

Donde

m Masa de la sustancia considerada, en kg

c Calor específico de la sustancia, $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

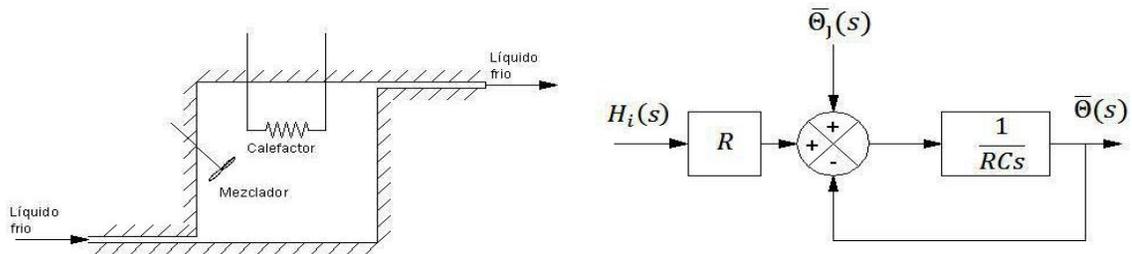


Fig. 45 Sistema térmico

$\bar{\theta}_j(s)$ Temperatura en estado estacionario del líquido que entra, en $^\circ\text{C}$

$\bar{\theta}(s)$ Temperatura en estado estacionario del líquido que sale, en $^\circ\text{C}$

G Gasto del líquido en estado estacionario, en kg/s

M Masa del líquido en el tanque, en kg

c Calor específico del líquido, en $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

R Resistencia térmica, en $^\circ\text{C s/kcal}$

C Capacitancia térmica, en kcal/ $^\circ\text{C}$

\bar{H} Flujo de calor de entrada en estado estacionario, en kcal/s

Considerando que la temperatura del flujo de entrada se mantiene constante, y que presenta un cambio súbito en el flujo de calor de entrada de \bar{H} a $\bar{H} + h_i$, donde h_i representa una variación pequeña en el flujo de calor de entrada, el flujo de calor saliente varía también gradualmente de, \bar{H} a $\bar{H} + h_0$, por lo tanto la temperatura el líquido saliente cambia de $\bar{\Theta}_0$ a $\bar{\Theta}_0 + \theta$ para este caso se obtiene:

$$h_0 = Gc\theta \quad 55$$

$$C = Mc \quad 56$$

$$R = \frac{\theta}{h_0} = \frac{1}{Gc} \quad 57$$

El modelo matemático para este sistema es:

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_0 \quad 58$$

Que se reescribe como:

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = Rh_i \quad 59$$

Note se que la constante temporal esta dado por RC o M/G segundos. Por lo que la función de transferencia que liga a θ con h_i esta dada por:

$$\frac{\Theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RC_s + 1} \quad 60$$

Donde:

$$\Theta(s) = \mathcal{L}[\theta(t)] \quad \text{y} \quad H_i(s) = \mathcal{L}[h_i(t)] \quad 61$$

3.2.4. Automatización

La AUTOMÁTICA se define como “La disciplina que trata de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea física o mental previamente programada” (28).

La automatización, es una ciencia que agrupa un conjunto de disciplinas teóricas y tecnológicas que intervienen en la concepción, construcción y el empleo de los sistemas automáticos. La automática constituye el aspecto teórico de la cibernética. Está estrechamente vinculada con las matemáticas, la estadística, la teoría de la información, la informática y técnicas de ingeniería (31).

Se puede realizar una distinción entre:

La automatización teórica: conjunto de métodos matemáticos de análisis y de síntesis de los sistemas automáticos y de sus elementos.

La automatización aplicada: que trata más específicamente de los problemas prácticos de automatización, que concierne a la teoría y a la tecnología de captadores, accionadores y ordenadores.

3.2.4.1. Sistemas automáticos

Un sistema automático es un conjunto de elementos, que se puede subdividir en Partes de Mando y Partes Operativas, ejemplificado en la Fig. 46. El funcionamiento de un sistema automático es la confrontación de una información de mando (que describe el programa deseado) con la información de estado (estado operativo del mecanismo). De esta confrontación se derivan órdenes de mando que se dan a los accionadores que actúan en el sistema, modificando así su estado.

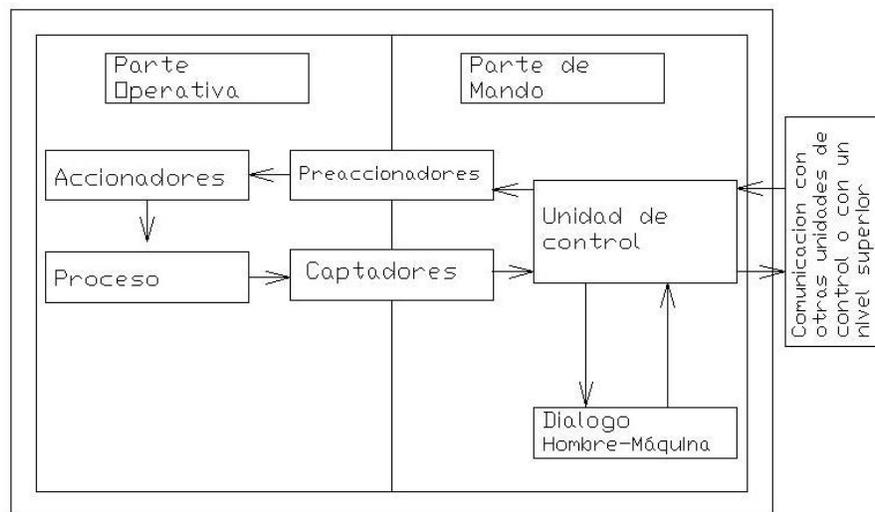


Fig. 46 Parte de mando y parte operativa

- Parte operativa: Está constituida por los elementos actuantes directamente sobre el sistema. Estos elementos hacen que el sistema realiza una operación (movimiento, activación, etcétera). La conformar toda clase de actuadores de la máquina, como son: motores de corriente ya sea continua o alterna, cilindros neumáticos, accionadores neumáticos, compresores, bombas, etcétera.

- Parte de mando: Por lo general esta parte la constituyen autómatas programables. Siendo este el centro del sistema de mando. Este debe de ser capaz de comunicarse con todos los sistemas de actuación del sistema automatizado.

3.2.4.2. Automatismos

Los sistemas o bloques lógicos se pueden dividir en dos grandes categorías: combinacionales y secuenciales.

Un sistema o bloques combinacional, es aquel cuyas salidas dependen únicamente del estado de sus entradas, con total independencia de estado inicial de la partida. El nombre combinacional se deriva principalmente del hecho que las variables de salida dependen exclusivamente de las combinación de las variables de entrada que se apliquen (32).

Un automatismo secuencial, es un sistema cuyo funcionamiento emplea una secuencia de fases claramente definidas, según un conjunto de reglas preestablecidas (detección de fin de fase da el paso inicial al inicio de las siguientes). Las condiciones de transición entre fases adaptan la forma de condiciones lógicas más o menos complejas provocando cambios de estado del sistema de control (31).

3.2.4.3. Diseño de un sistema secuencial

En la actualidad existen muchos procesos que implican la realización de una serie de actividades u operaciones, siguiendo una determinada secuencia. Dichas actividades y dispositivos empleados para ejecutar pueden ser de índole muy diverso, incluyendo partes lógicas, analógicas, cálculos aritméticos, manipulación de datos, etcétera, pero el desarrollo del proceso consiste casi siempre en una sucesión encadenada de operaciones, cuya evolución se controla mediante unas condiciones del tipo lógico, que indican si el proceso puede continuar y como.

GRAFCET

Uno de los métodos de diseño que se emplean actualmente es el GRAFCET, el cual tiene como objetivos el satisfacer la necesidad de disponer de un método de descripción de proceso, con total independencia de la tecnología, mediante un gráfico funcional (32).

Algunos de los principios que motivan la creación del GRAFCET son, los cuales son mostrados en la Fig. 47:

- Caracterizar el funcionamiento del autómata con total independencia de los componentes con los que vaya a ser construido.
- El conjunto de un sistema automático se divide en dos parte; Parte de control (PC) y parte operacional (PO.)
- Definición de los elementos fundamentales del proceso (operaciones)
- Diluir las operaciones más elementales, solo dependientes de la fase de entrada salida de la actividad.

- Establecer una secuencia evolutiva del proceso, el cual ligue cada una de las actividades de éste, así como las condiciones lógicas para pasar de una actividad a otra (condiciones de transmisión)
- Establecer para cada operación elemental, la secuencia lógica entre entradas y salidas.
- Implementación del sistema utilizando biestables como variables de estado y programando las relaciones lógicas obtenidas en los apartados anteriores.

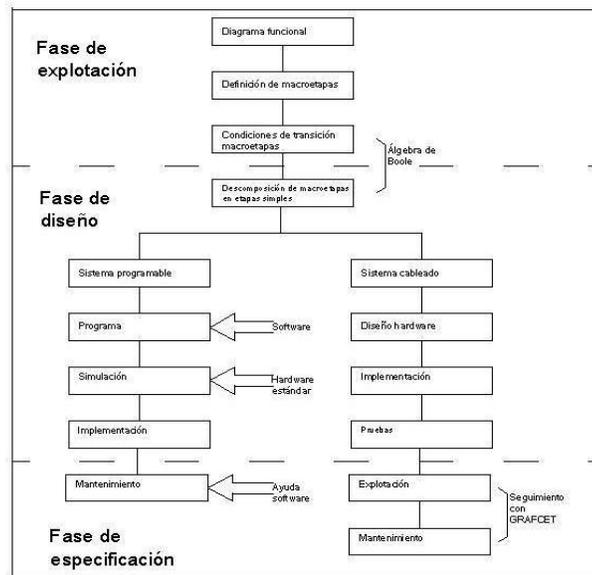


Fig. 47 Fases de diseño del GRAFCET

Elementos gráficos del método GRAFCET, como se observan en la Fig. 48 (32)

- Etapa: Representa cada uno de los estados del sistema, esta incluye la etapa de inicio (etapa en la cual el sistema se posiciona al comenzar el proceso).
- Líneas de evolución: Unión de las etapas, representan la secuencia del sistema.
- Transiciones: Representan las condiciones lógicas para que finalice la actividad e inicie la etapa o etapas inmediatamente consecutivas.
- Reenvíos: Indican el destino o procedencia de las líneas de evolución.
- Objeto de desviación paralela: Conecta etapas que deben de realizarse simultáneamente.
- Objeto de unión paralela: Conecta etapas realizadas simultáneamente a una misma salida.

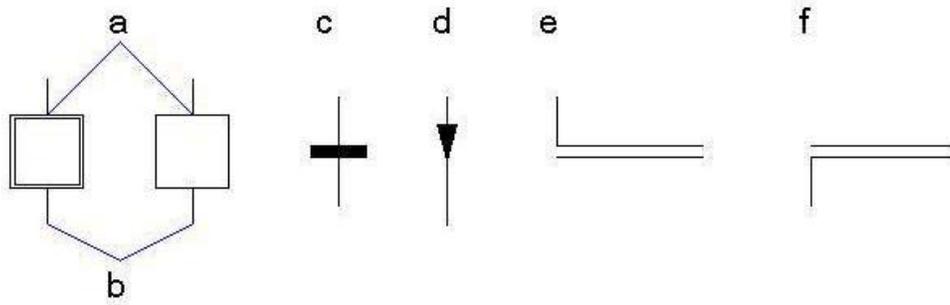


Fig. 48 Elementos gráficos del GRAFCET (33)

Mensajes (32).

- Mensaje de acción asociado a cada etapa: Indica la actividad a realizar en dicha etapa, esta puede ser representada en forma de texto o en forma de ecuación lógica.
- Mensaje de receptividad asociada a transición: Estos mensajes indican las condiciones lógicas necesarias para pasar de una etapa a la consecutiva.

Reglas básicas de construcción, Fig. 49.

- Una etapa debe de estar siempre integrada por una entrada y una salida.
- Cada etapa debe de estar dividida por una transición y cada transición por una etapa.

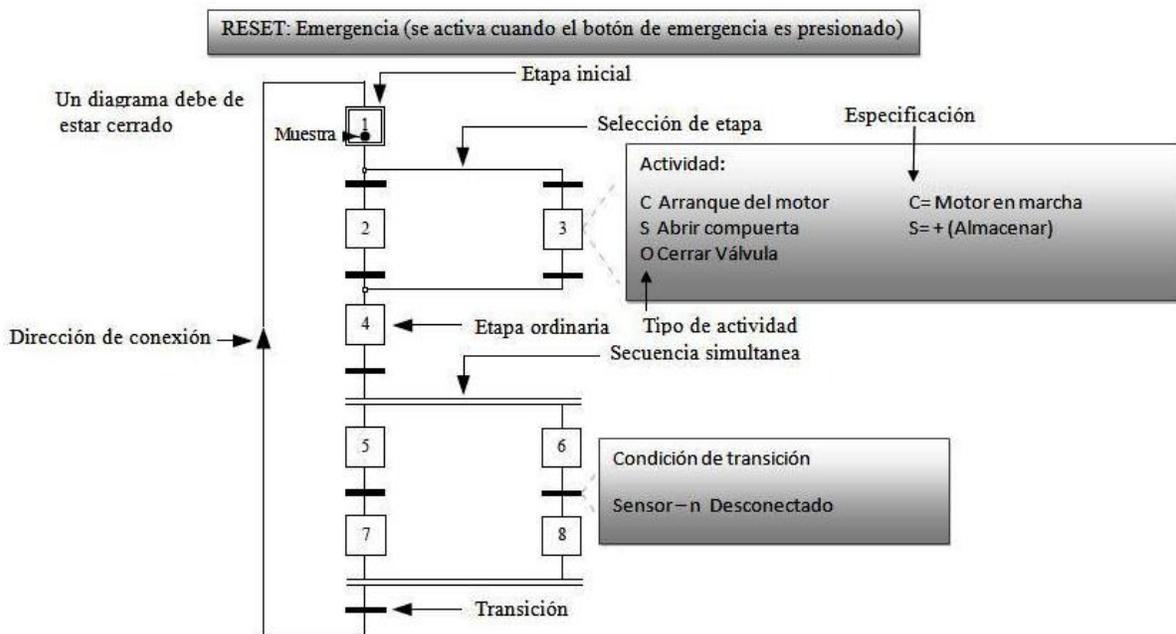


Fig. 49 Conceptos del GRAFCET

3.2.5. Lenguajes de programación

Un programa es un conjunto de instrucciones ordenadas de una forma de terminada o secuencia de órdenes, que permiten al autómata, a través de su ejecución, realizar la secuencia de control deseada por el programador a usuario del mismo.

Las instrucciones pueden ser de diferentes tipos, desde instrucciones de acceso a módulos de entrada y salida, hasta operaciones aritméticas y lógicas, pasando por movimiento y transferencia de bits y datos.

Estas operaciones constan de dos campos (34):

1. El código de la operación: Indica al CPU la tarea u operación que se ha de realizar. Esta operación puede ser aritmética (suma, resta, productos, etcétera), lógicas (OR, AND, etcétera), movimiento de datos, etcétera.
2. Las operaciones asociadas a la misma: Pueden ser daros o dirección de algún elemento, es el complemento al código de operación e indican dónde i sobre qué elemento debe realizar dicha operación.

Se definen cuatro lenguajes de programación normalizados. Esto significa que su sintaxis y su semántica han sido definidas, no permitiendo particularidades distintivas (dialectos).

Esto leguajes se definen como:

- Literales
 - Lista de instrucciones (Instruction List, IL)
 - Texto estructurado (Structured Text, ST)
- Gráfico
 - Diagrama de contactos (Diagram Ladder, LD)
 - Diagrama de bloques funcionales (Function Block Diagram, FBD)

3.2.5.1. Álgebra Booleana

El método analítico y modelado de los autómatas, se establece a partir de la naturaleza de las variables que intervienen en éstos. Por lo general estos sistemas son de tipo secuencial en el tiempo por lo que le conjunto de variables de el sistema de entrada, salida y estado poseen únicamente dos estados claramente definidos “ON” y ”OFF”, por lo que su naturaleza es discreta y binaria.

Por eso, para establecer las relaciones funcionales entre las variables que intervienen se utiliza el Álgebra Booleana, herramienta matemática que permite la definición de funciones lógicas capaces de relacionar un conjunto de variables discretas binarias.

El álgebra Booleana, fue presentada originalmente por el Ingles George Boole, en 1854. Sin embargo las primeras aplicaciones a circuitos de conmutación fueron desarrollados por Claude Shannon en 1938 (32).

- d. Variables involucradas en la operación, ninguna, uno o varias constantes o variables para la operación o de parámetros de entrada son utilizados para realizar esta función, estos deben de ir separados por comas
- e. Formato de comentario (*.....*), (estos son opcionales)

Nota:

Es necesario señalar que entre el operado y las variables es necesario un estacione blanco, para distinguir las variables del operador, Fig. 51.

MRun:	LD	%IX3.0	(*Load bit from I/0*)
	AND	Timer_1	(*Mask with variable Timer_1*)
	ST	PRun	(*Store value of Run Process*)
			(*Empty instruction*)
	CALC	Process	(*Call conditionally FB Process, if PRun=TRUE*)
	JMPCN	MRun	(*Jump, if PRun=FALSE*)
Etiqueta	Operador /función	Variables	Comentarios

Fig. 51 Ejemplo de programación con IL

- Las etiquetas son necesarias para permitir saltos en el programa ejecutable para ser realizado desde cualquier otra línea en el programa. No se debe de colocar una etiqueta en una línea en blanco, sin embargo es posible realizarse.
- Una operación/función individual describe la operación deseada.
- Las variables se definen por el tipo, precisión y aplicación que se le dé en la programación.
- Los comentarios dependen de la información que defina el funcionamiento de la operación y solo están delimitados por su formato (*.....*).

El acumulador universal (Resultados concurrentes CR)

El ensamblador estándar es usualmente basado en un acumulador real de un proceso, un valor es cargado dentro del acumulador, los valore más lejano son añadidos, extraídos, analizados y finalmente los resultados son acumulados en una memoria local(35).

IL también ofrece una acumulador llamado “Current Result (CR)”. De cualquier forma, el CR no tiene una forma de acomodar el número de bit como un hardware acumulador. El IL trabaja con un acumulador virtual donde cualquier tamaño de almacenamiento es válido. El número de bits depende del tipo de dato de la variable que es procesada (35).

Un CR puede ser del tipo:

- Tipo de dato elemental
- Dato derivado (estructural, matricial, etcétera)
- Función de bloque

3.2.5.3. Estructura textual (ST)

El ST es llamado un lenguaje de alto nivel, porque este no usa un nivel bajo, operadores de orientación mecánica pero ofrece un amplio rango de operaciones abstractas describiendo el contexto funcional en varios caminos comprimidos (35).

Ventajas del ST (comparado con el IL)

- La formulación de las tareas programadas es muy corta
- Clara construcción de programas en estructura de bloques
- Elevada construcción para controlar el ciclo de comandos

Desventajas

- La transición hacia el código mecánico no puede ser directamente influenciado por el usuario desde, este es realizado automáticamente por la definición del compilado.
- El elevado grado de abstracción puede ser dirigido hacia la pérdida de eficiencia

Un ST está dividido dentro de diferentes declaraciones. Una declaración es usada para computarizar y asignar un valor, para controlar el flujo de comandos y para llamar o dejar un POU.

Podemos comparar este sistema con PASCAL y C, lenguajes para programar PC.

Un programa ST consiste de un número de estados. Los estados son separados por semicolonas (;). Diferente a IL el “fin de línea”, pie de línea, es interpretado sistemáticamente como un espacio, Fig. 52. Esto significa que un estado puede ser extendido sobre muchas líneas o muchos estados pueden ser escritos en una línea, los elementos integrantes se enlistan en la Tabla 11.

Los comentarios son formados por paréntesis y asteriscos (*comentario*), y pueden ser usados dentro del estado en todos los lugares donde el espacio lo permita (35).

```
A:=B(*elongación*))+C(*temperatura*);
```

Fig. 52 Ejemplo de línea de programación de ST

Tabla 11 Símbolos para la programación ST

Símbolo	Descripción	Ejemplo	Explicación
:=	Asignación	d.:= 10;	Asigna un valor o un cálculo a la variable.
	Llama a una FB ^a	FBName(Part1:=10, Part2:=20);	Llama a otro POU de tipo FB incluyendo sus parámetros
RETURN	Retorno	RETURN	Salida de la POU activo y regresa a llamar el POU designado

IF	Selección	<pre> IF a<e THEN f:=1; ELSEIF d=e THEN f:=2; ELSE f:=3; END_IF; </pre>	Selección de diferentes alternativas definidas por expresiones Booleanas
CASE	Selección múltiple	<pre> CASE f OF 1: g:=11; 2: g:=12; ELSE g:=FunName(); END_CASE; </pre>	Selección de un bloque de estado, dependiendo de la valor de la expresión f
FOR	Interacción (1)	<pre> FOR h:=1 TO 10 BY 2 DO f[h/2]:=h; END_FOR </pre>	Múltiple ciclo de un bloque de estado con una condición de inicio y un final y una valor incremental
WHILE	Interacción (2)	<pre> WHILE m>1 DO n:=n/2; END_WHILE; </pre>	Múltiple ciclo de un bloque de estado con una condición de inicio
REPEAT	Interacción (3)	<pre> REPEAT I:=i*j; UNTIL i<10000 END_REPEAT; </pre>	Múltiple ciclo de un bloque de estado con una condición de termino
EXIT	Fin de ciclo	<pre> EXIT; </pre>	Termino prematuro de un estado iterativo
Estado vacío			

3.2.5.4. Diagrama de Bloques Funcionales (FBD)

Una bloque funcional puede proporcionar un software para una solución a un pequeño problema, desde el control de una válvula, o el control de una unidad de una planta hasta el control de toda una línea de producción. El bloque funcional permite el desarrollo de algoritmos para ser encapsulados en una forma que puedan ser usados, entendidos y aplicados por personal que no es especialista en el software. Cada bloque funcional tiene una definición de variables de entradas, que son leídas por el algoritmo interno cuando este es ejecutado. Los resultados de este algoritmo son escritos en otro bloque de salida. La aplicación completa puede ser construida desde una red de trabajo de bloques funcionales formado por interconexiones entre bloques de entrada y salida (36).

La metodología de programación BFD descrito por la norma IEC 61499, nos describe una forma de bloque funcional independiente de la implantación. La metodología puede ser usada como parte de el sistema de ciclo de vida. El diseño de un sistema de control típico comienza con el análisis del diagrama físico de la planta y la documentación del sistema de control requerido. Este análisis está dirigida hacia la definición de áreas de funcionamiento y su interacción con la planta. La fase final resulta en el mapeo de funcional dentro de los recursos físicos como es el PLC, instrumentación y sistema de control (36).

Fase de diseño funcional

Durante esta fase, se desarrolla el proceso ingenieril de análisis del diseño de la planta física, un ejemplo de esto es el Proceso y diagrama de instrumentación (Process and Instrumentation Diagram P&ID), para definir las principales funciones requeridas, mostradas en la Fig. 53. En esta fase, la programación de los bloques funcionales no son considerados y en la mayoría de los diagramas que muestran el sistema físico de la plata o mecanismos, también muestran la localización de los elementos activos como válvulas y bombas, y los puntos de instrumentación, así como la localización de los diferentes sensores que definen el sistema (36):

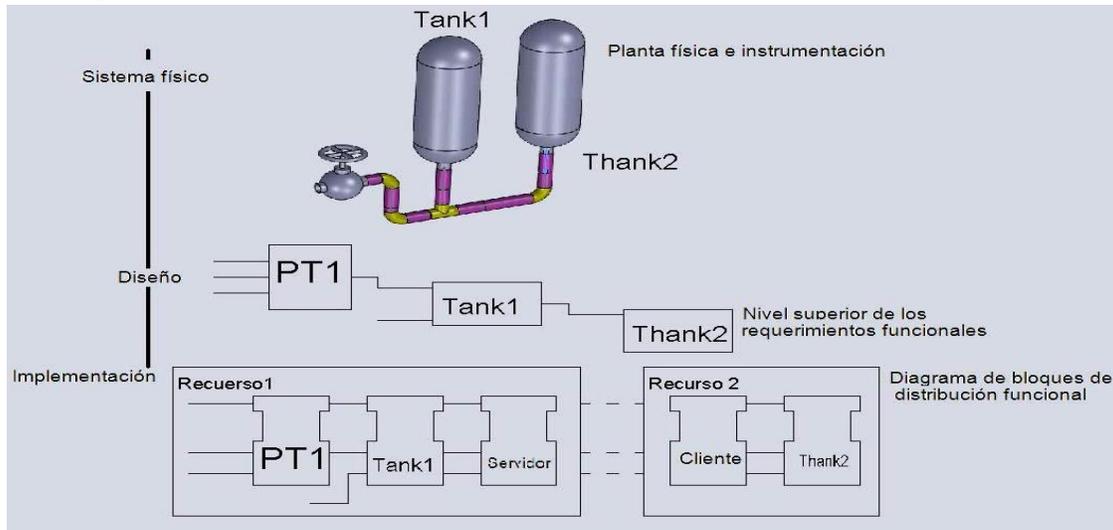


Fig. 53 Fases de aplicación de la IEC 61499

Fases de distribución funcional

En un sistema distribuido se requiere una fase de diseño más amplia para definir la distribución de la funcionalidad del control en el procesamiento de los recursos. Los ingenieros de sistema complementan los detalles del diseño por las necesidades del mapeo del software requerido para usarse en la especificación de los bloques funcionales. Estos serían distribuidos en varios recursos de proceso. En la mayoría de los casos, los bloques funcionales como está probados en los elementos de campo (36).

Cada uno de los bloques funcionales empleado, tendrá su propio software diseñado para su ciclo de vida. Algunos serán diseñados específicamente par un sistema de aplicación en particular, y en otros casos, existen bloques dentro de instrucciones y controladores que pueden ser usados, como en la Fig. 54.

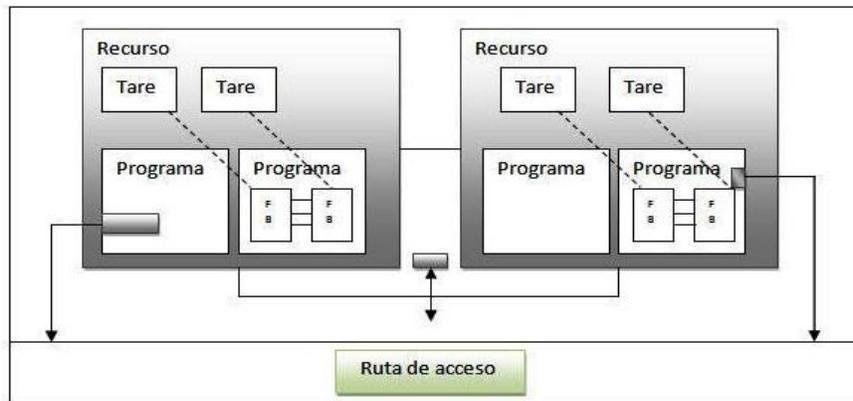


Fig. 54 Modelo de software realizado por el estándar IEC 61131

3.2.5.5. Diagrama de contactos (LD)

El lenguaje de programación de Diagrama de contactos es aun considerado como un sistema de relé lógico de escalera. Es un lenguaje gráfico que es muy popular para la programación de sistemas de control. La mayoría de los programas de manufactura usan el diagrama de contactos como lenguaje de programación.

El diagrama de contactos (LD) es un método de programación básicamente gráfico. Este es una representación simbólica de un circuito eléctrico. En LD, los símbolos esquemáticos (contactos y bobinas) y las líneas de conexión son usados para crear la lógica necesaria.

Propiedades

El diagrama de contactos tiene las siguientes características:

- Lenguaje de programación gráfico
- Similar al diagrama de cableado
- Programación clara y simple
- De uso intuitivo
- Fácil de encontrar errores en la programación
- Compatible con el estándar IEC 61131-3

Elementos básicos de un diagrama de contactos

El diagrama está basado en una línea (bus bar) en el lado izquierdo, la cual representa una conexión de energía. La línea que crece hacia el lado derecho, se denomina línea de instrucciones, Fig. 55.

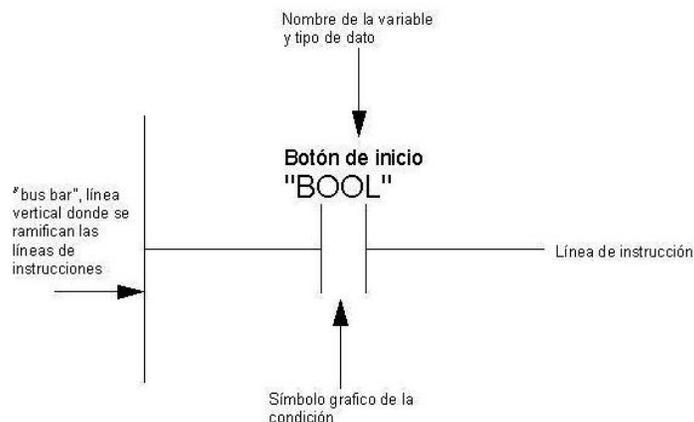


Fig. 55 Elementos de LD

El LD consiste de dos partes básicas. Del lado izquierdo tiene las condiciones lógicas, mientras que el lado derecho contiene las instrucciones. La combinación lógica de estos componentes determina el cuándo y cómo una instrucción en el lado derecho es ejecutada. Los elementos del lado derechos son denominados “bobinas” (lámpara, motores, relé, etcétera), Fig. 56.

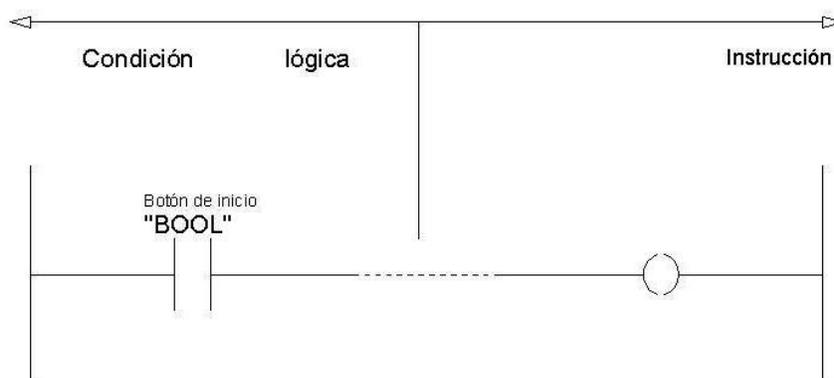


Fig. 56 Conducción lógica e instrucción

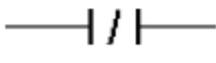
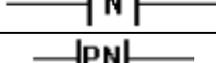
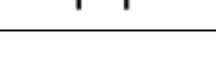
Contactos

La conexión entre los contactos depende de la configuración de los controladores lógicos. Estos pueden ser colocados en configuración serie, paralelo o serie/paralelo que es requerida para controlar una variable de salida.

Los contactos solo pueden ser asignados como variables Booleanas mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12 Símbolos de variables Booleanas (Contactos)

Tipo de contacto	Símbolo
Normalmente abierto	

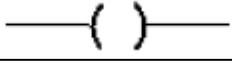
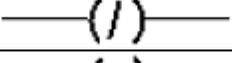
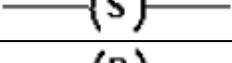
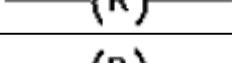
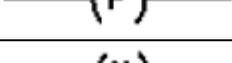
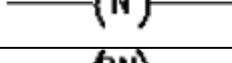
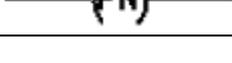
Normalmente cerrado	
Eje positivo	
Eje negativo	
Ambos ejes	

Bobina (Coil)

La bobina es uno de los elementos básicos del diagrama de contactos. Estos siempre van colocados en la parte derecha del diagrama, como las salidas o actuadores. Las bobinas pueden ser precedidas ya sea de contactos o de bloques funcionales de salida. Cada bobina puede ser utilizada como una salida digital o como variables internas que después pueden ser utilizadas como entradas para otras funciones del mismo programa.

Solo las variables Booleanas pueden ser asignadas como bobinas, Tabla 13.

Tabla 13 Símbolos de variables Booleanas (Bobinas)

Tipo de bobina	Símbolo
Bonina	
Bobina negativa	
Bobina de estado	
Bobina de "RESET"	
Bobina de transición positiva	
Bobina de transición negativa	
Ambos ejes	

3.2.6. Sistema Hombre-Máquina

La tecnología es el motor que impulsa el diseño de interfaces, permitiéndonos crear ambientes complejos a partir de técnicas de interacción y visualización cada vez más ricas y poderosas.

Ciencias de la Computación conocida como "Interacción Humano-Computadora" (HCI de sus siglas en inglés) o "Ergonomía de Aplicaciones Interactivas". El objetivo de dicha disciplina es estudiar la manera como se relacionan los usuarios con las computadoras, de modo a poder establecer criterios, modelos, metodologías y herramientas que ayuden a desarrollar software *de calidad* (Senach, 1990), es decir (37):

- *Útil*: El software contiene las herramientas necesarias para realizar la tarea para la cual fue hecho;

- *Utilizable* (del inglés *usable*): El software debe de ser diseñado y organizado de tal manera, que:
 - Facilitar su aprendizaje a los usuarios
 - Permitir realizar sus tareas más rápido y con menos errores
 - Facilitar el recordar la secuencia de comandos necesaria para alcanzar un objetivo
 - Brindar una satisfacción subjetiva, etcétera (38).

3.2.6.1. Ergonomía de Aplicaciones Interactivas

En su acepción más simple, la ergonomía es la disciplina que estudia los mecanismos, experiencias, lineamientos, y procedimientos, que permiten la fabricación de artefactos que se adapten al humano, y eviten que tenga que ser el humano el que se adapte a ellos. Así, cuando se habla de una silla ergonómica, se habla de una silla que ha sido diseñada considerando las características del usuario que la va a utilizar (tamaño, peso, tarea a desarrollar, etcétera), y del ambiente en que será utilizada.

La ergonomía de aplicaciones interactivas es la disciplina que se encarga de estudiar las características del usuario (capacidad para procesar información, capacidad de retención, capacidades físicas, experiencia, conocimientos previos, preferencias, etcétera), así como de su tarea (características, informaciones y materiales necesarios, sincronización de las actividades que la componen, etcétera) Estas informaciones son organizadas en modelos, guías de estilo, recomendaciones y criterios, de modo que puedan ser utilizados tanto en los ciclos de desarrollo informáticos, como en la evaluación de aplicaciones.

El objetivo es integrar las informaciones señaladas a ciclos de concepción informáticos, que permitan generar aplicaciones centradas en el usuario; es decir, aplicaciones que el usuario pueda utilizar de manera óptima y sin grandes inversiones de tiempo, para esto se definen los conceptos enlistados en la Tabla 14. Dichas aplicaciones tienen como distintivo, el reflejar de manera clara la propia percepción del usuario sobre el trabajo a realizar (38).

Tabla 14 Aportación de la ergonomía al ciclo de desarrollo de software.

	Etapas en el desarrollo de un proyecto informático	Posibilidades de intervención de la ergonomía
Análisis de requerimientos	Explotación	Estudio de oportunidades
	Definición del problema	Análisis ergonómico de tareas
	Propuesta de solución	<ul style="list-style-type: none"> – Modelado de tareas – Selección general de ambiente, material y programas
Concepción	Concepción del sistema	<ul style="list-style-type: none"> – Especificaciones de necesidades – Especificaciones provisionales para creación de prototipos
	Análisis general	
	Especificación de funciones	Evaluación y validación

Implementación	Análisis de detalle	Generación y validación de prototipos
	Programación de prueba	
	Validación técnica	

Se han desarrollado algunos criterios ergonómicos (por Scapin, D.L. y Bastien J.M.C. 1997) que pueden guiarnos en la evaluación de un producto desde un punto de vista que no es el técnico. Los criterios están organizados en ocho puntos principales (algunos pueden a su vez estar subdivididos en criterios más específicos), y tienen dos objetivos principales:

- a) definir o formalizar las diferentes dimensiones que conforman el concepto de “*utilizable*”, sustento de lo que denominamos “*Software de Calidad*”
- b) brindar una herramienta que facilite, mejore y documente el proceso de evaluación de las interfaces-usuario.

Estos criterios son (37):

1. Guía: Se refiere al conjunto de medios que permiten orientar, informar, instruir o guiar al usuario a través de su interacción con la computadora (mensajes, alarmas, etiquetas, etcétera)

Se divide en cuatro criterios:

- Incitación: Agrupa todos aquellos mecanismos que permiten encaminar a los usuarios para que realicen acciones específicas. También engloba las acciones que indican al usuario el conjunto de operaciones posibles, así como aquellas que le ayudan a identificar el lugar donde se encuentra dentro de la aplicación.
 - Agrupación/distinción de elementos: Evalúa la estructura visual de los diferentes elementos que se encuentran en la interfaz. Este criterio toma en cuenta la topología y la distribución espacial de las informaciones desplegadas, su pertenencia a una misma clase, o la diferenciación entre elementos diferentes.
 - El agrupamiento o distinción de elementos puede ser realizado en base a dos criterios diferentes: agrupación/distinción por localización; y agrupación/distinción por formato.
 - Retroalimentación inmediata: Se refiere a las respuestas que el sistema brinda para cada acción del usuario.
 - Legibilidad: Se refiere a las características de la información en pantalla que puedan facilitar o dificultar su lectura.
2. Carga de trabajo: Concierno a todos los elementos de la interfaz que juegan un rol en la percepción del usuario o en la carga cognitiva, así como en una mejor eficiencia en la interacción.

Se divide en dos criterios:

- Brevedad: Corresponde al hecho de limitar la lectura, las acciones de entrada y en general el número de acciones necesarias para realizar una tarea. Este criterio se subdivide a su vez en dos criterios: o Concisión: Se refiere a que las etiquetas, los comandos y las regiones sensibles, deben ser cortos y claros. En el caso de captura

de datos, el sistema debe interpretar y completar la información cuando sea posible (ex. ceros a la izquierda, guiones intermedios, etcétera) o Acciones mínimas: Se refiere al número de pasos que un usuario debe realizar para llegar a su objetivo. Entre menor sea este número, más eficiente será el sistema.

- Densidad de información: Se refiere a la carga de trabajo perceptual y cognitiva ocasionada por grupos de elementos, y no por elementos aislados como en el caso de *Brevedad*.

3. Control Explícito: Concierno al procesamiento por parte del sistema de acciones explícitas del usuario, así como el control que debe tener el usuario sobre un proceso.

Se divide en dos criterios:

- Acciones explícitas del usuario: El sistema debe realizar únicamente aquellas acciones señaladas por el usuario.
- Control del usuario: El usuario debe tener el control de la aplicación todo el tiempo.

4. Adaptabilidad: Se refiere a la capacidad de un sistema para comportarse de manera contextual y de acuerdo a las necesidades y preferencias del usuario.

Se divide en dos criterios:

- Flexibilidad: Es la capacidad de la interfaz para adaptarse a las necesidades particulares de los usuarios. Una buena flexibilidad permite al usuario adaptar la interfaz a sus necesidades.
- Experiencia del usuario: Mecanismos que permiten respetar el nivel de experiencia del usuario en cuanto al uso del sistema.

5. Manejo de errores: Se refiere a los medios disponibles para prevenir o reducir errores, y para recuperar la información cuando éstos ocurran.

Se divide en tres criterios:

- Protección contra los errores: Evitar en lo posible que el usuario cometa errores.
- Calidad de los mensajes de error: Los mensajes de error deben de ser claros y concisos.
- Corrección de los errores: Una vez que el usuario ha cometido un error, el sistema debe ofrecer mecanismos que permitan la recuperación del estado inmediato anterior.

6. Consistencia: Se refiere a la manera en que el diseño de una interfaz se mantiene para contextos similares, y se diferencia para contextos diferentes.

7. Significado de códigos: Califica la relación entre un término y/o un signo, y el objeto o comando al que hace referencia. Los códigos y los nombres son importantes para los usuarios cuando existe una relación clara entre tales códigos y las acciones.

8. Compatibilidad: Se refiere a la relación que hay entre las características del usuario (memoria, capacidad cognitiva, capacidad perceptual, experiencia, preferencias, etcétera.) y su tarea (qué hace, cómo lo hace, que objetos utiliza, en qué momento,

etcétera.), con respecto a la organización de las entradas/salidas, y el diálogo de la aplicación.

3.2.7. Actuadores neumáticos.

Sistemas de fluido a presión

Componentes activos:

- Generadores: producen un volumen de fluido a presión: bombas, compresores, que estarán caracterizados por su cilindrada, V , volumen desplazado por unidad de desplazamiento angular o revolución:

$$\text{Caudal: } Q = \omega_i \vartheta$$

66

$$\text{Potencia: } W = T_i \dot{\omega}_i = PQ$$

67

- Moduladores: Válvulas direccionales, válvulas reguladoras de presión $P \gg P'$, válvulas reguladoras de caudal $Q \gg Q'$.
- Receptores: Cilindros, movimiento lineal;

$$\dot{W}_0 = P'Q' = F_0 v_0.$$

68

Motores, movimiento circular;

$$\dot{W}_0 = P'Q' = T_0 \omega_0.$$

69

Componentes de unión

- Fluido: Transporta la energía, lubrica partes móviles, refrigera; debe de ser filtrado y se le añaden aditivos.
- Conducción: Transportan los fluidos, su selección, concepción e instalación influyen en la eficiencia y a la fiabilidad de un sistema de fluido a presión.

Componentes pasivos

- Deposito: Reserva de fluido, protección del fluido frente a posibles contaminantes.
- Intercambiadores: elevan o disminuyen la energía térmica del fluido.
- Filtros
- Lubricantes

Para la consideración del uso de alguno de estos sistemas de transmisión de energía, se deben de tomar en consideración los siguientes factores:

1. Factor dinámico: Desplazamiento y velocidad, esfuerzo, frecuencia de oscilación, tiempo de reacción.
2. Factores ambientales: Temperatura, ruido, impacto, apariencia, limpieza, seguridad, contaminación.
3. Factor de utilidad: Posibilidad y facilidad de uso, protección frente a imprevistos (sobrecarga, vibración, choque), adaptación a la automatización.
4. Factor económico: Costo directo, de ejecución y de funcionamiento (mantenimiento, almacenaje).
5. Factor social: Formación del personal.

Sistemas neumáticos

Los sistemas neumáticos se utilizan mucho en la automatización de maquinaria de producción y en el campo de los controladores neumáticos. Procesos como: remachado, perforado, estampado, etcétera., pueden ser perfectamente automatizados utilizando neumática, siempre y cuando pueda conseguirse un sistema de posicionamiento múltiple.

Adelantos en tecnología electroneumática han dado por resultado una clase de actuadores proporcionales servo neumáticos controlados electrónicamente y que han sido probados en sistemas de automatización ofreciendo una solución económica.

La principal ventaja de un sistema servoneumático moderno es su economía y simplicidad cuando se compara con otras tecnologías de presentación equivalente. Los componentes neumáticos no incrementan en precio tan rápido como lo hacen los motores eléctricos.

La compañía alemana FESTO, afirma en uno de sus boletines que los sistemas servoneumáticos pueden cumplir los requisitos de exactitud exigidos por más del 80% de las aplicaciones que conllevan un control de posición (39).

Los actuadores neumáticos han sido utilizados habitualmente debido a sus conocidas ventajas: bajo coste, facilidad de mantenimiento, alta prestaciones, elevada relación potencia-peso, etcétera. Sin embargo presentan diferentes características que provocan la necesidad de un estudio bastante detallado para su uso en aplicaciones donde se requiera una elevada precisión como es el caso de la robótica. Algunas de estas características son: funcionamiento no lineal debido a la compresibilidad del aire, presencia de fenómenos de fricción, utilización de válvulas no lineales.

La determinación experimental del modelo del sistema válvula-cilindro neumático resulta fundamental para el buen diseño de la estrategia de control y el regulador en sí que se pueda implementar a bajo nivel para el control de posición del sistema (39).

Existen diferentes actuadores en el mercado (hidráulicos, neumático, eléctricos, etcétera.), pero los actuadores neumáticos se destacan por su relación fuerza/peso y por su bajo costo. Sin embargo, presentan como principal inconveniente su dificultad de control debido a la presencia de no linealidades en todo su recorrido debido fundamentalmente a las propiedades del aire comprimido en su flujo dentro de la cámara del cilindro.

Los actuadores neumáticos se delimitan en dos diferentes campos de acción, Fig. 57:

- Esfuerzo lineal - Empuje rectilíneo.
- Esfuerzo rotativo – Movimiento radial.



Fig. 57 Actuador neu

Firestone desarrollo el fuelle neumático a fine s de 1930 como una forma más eficiente de amortiguamiento (aislador de vibraciones) para ser usado en la suspensión de los vehículos.

Airstroke (actuador), Airmount (aislador) y Airide (amortiguador) son nombres registrados por Firestone para un solo producto “ The air spring”, el uso de este como actuador, aislador industrial o de vehículo respectivamente, determinan que nombre se le aplica (107).

Ventajas del actuador “Airstroke”

- Bajo costo: generalmente, el costo general es la mitad o menos que el del actuador neumático o hidráulico convencional de la misma capacidad de carga.
- Amplia gama de medidas: Los actuadores Airstroke cuentan con un rango desde 85mm hasta 940mm de diámetro y un rango de fuerza hasta los 450 kN.
- Durabilidad: Fireston ha probado el Airide en la suspensión de diferentes vehículos, demostrando una gran durabilidad en diversos ambientes de trabajo.
- No requiere mantenimiento o lubricación.
- Ni contiene mecanismos internos
- Libre de fricción para una inmediata respuesta

- Flexibilidad de operación: Un actuador Airstroke puede trabajar ya sea con líquido o gas.
- Capacidad de trabajo angular.
- Dimensiones de inicio de trabajo compacto.

Estos tipos de trabajo se definen como se muestra en la Fig. 58 y Fig. 59.

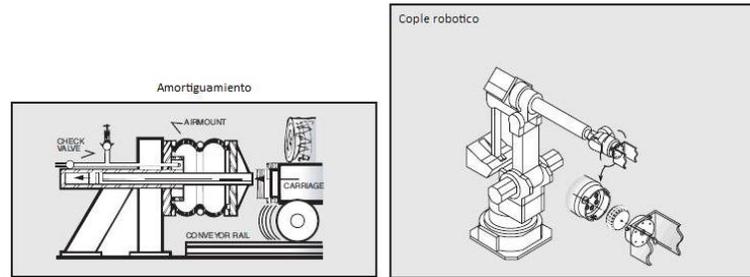


Fig. 58 Aplicación del fuelle neumático

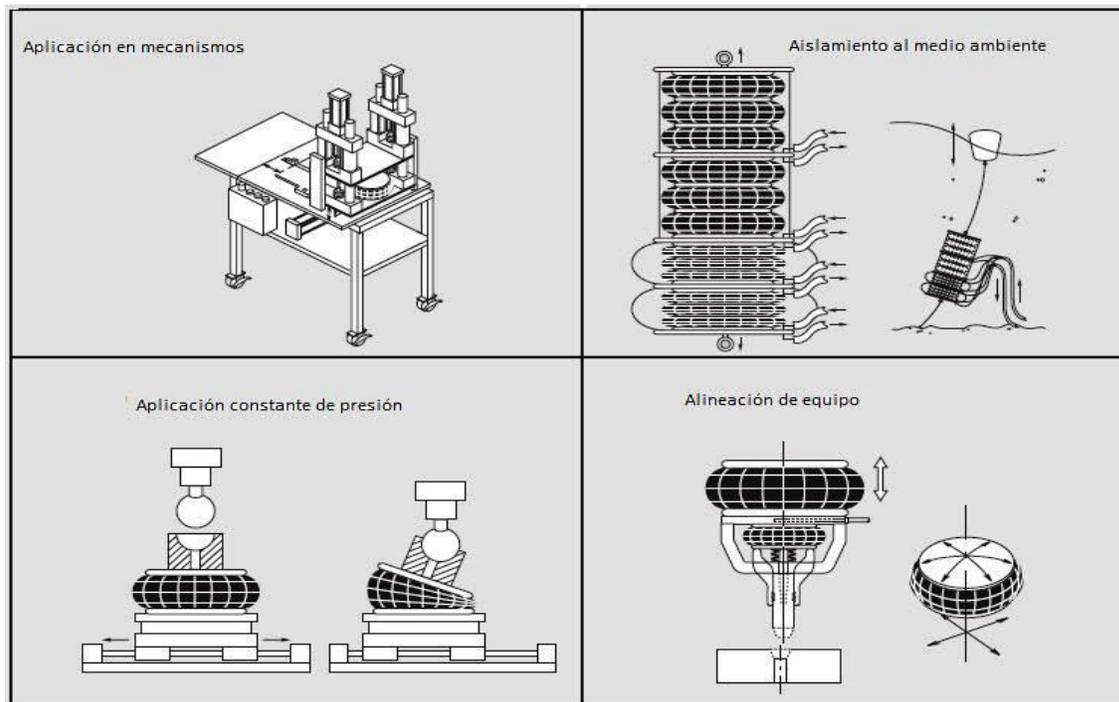
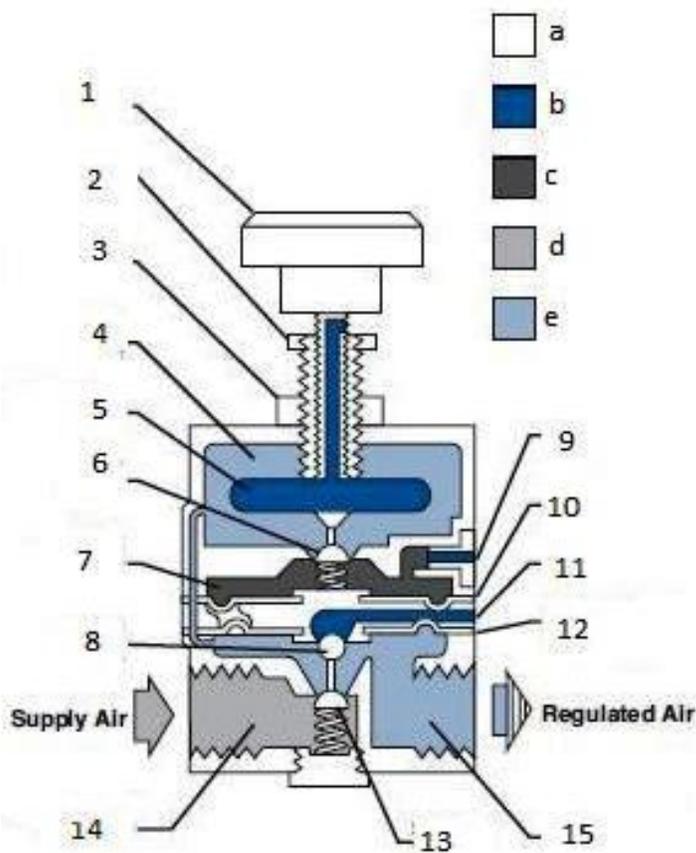


Fig. 59 Características de trabajo

Válvulas de control

En el control automático de los procesos, la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de la regulación, Fig. 60. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el caudal de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable.



1. Mando de ajuste
 2. Tuerca
 3. Panel de montaje de turca
 4. Cámara de control
 5. Cámara de medida
 6. Válvula piloto
 7. Cámara de presión piloto
 8. Válvula de seguridad
 9. Alivio
 10. Diafragma piloto
 11. Ventilación de alivio
 12. Diafragma de control
 13. Válvula de suministro
 14. Presión de suministro no regulada
 15. Presión de control regulada
- a) Estructura del regulador
 b) Presión atmosférica
 c) Presión piloto
 d) Suministro de presión
 e) Presión regulada

Fig. 60 Válvula reguladora

3.2.8. Adquisición de señales y monitoreo de estado.

La necesidad de adquirir datos y su posterior análisis está claramente ligada al desarrollo experimental de la ciencia; a su vez, las necesidades crecientes en esta área justifican la tarea de diseñar sistemas eficientes que realicen los procesos de adquisición. Con este objetivo se han desarrollado numerosos dispositivos (hardware y software) capaces de medir y depurar datos; la elección de un sistema determinado para construir la plataforma de adquisición depende entonces de las facilidades que este ofrezca tanto para adquirir como para procesar información.

La tarjeta de adquisición de datos es uno de los equipos más utilizados por los ingenieros electrónicos en formación en las áreas de instrumentación, control automático y procesamiento digital de señales; el costo de un equipo de estos puede variar significativamente dependiendo del tipo de conexión, PCI (PCI Interest Group, 1998) o USB (Universal Serial Bus Group, 2007), la máxima frecuencia de muestreo soportada y la licencia del software de control para el computador.

Sistema de adquisición de datos

Para construir una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo orientada a la enseñanza se deben considerar dos aspectos importantes. El primero viene dado por la creciente popularización del computador portátil al interior de los centros de formación en ingeniería por parte de los estudiantes y docentes, esta tendencia hace atractiva la conexión USB para el trabajo en el laboratorio y el hogar. El segundo aspecto tiene que ver con el software de control, ya que en la mayoría de los programas de ingeniería electrónica se cuenta con licencias de paquetes como LabView® (National Instruments®, 2003) y MATLAB® (Mathworks®, 2008) cuyos costos pueden superar varios cientos de dólares.

En el mercado existen múltiples opciones para tarjetas de adquisición de datos con conexión USB, sin embargo en muchas universidades, como es el caso de la Universidad del Quindío, son utilizadas las fabricadas por las corporaciones estadounidenses National Instruments® y LabJack®, en particular son populares las referencias NI USB-6008 (National Instruments®, 2005) y LabJack U12 (LabJack®, 2004) de ambos fabricantes respectivamente. El modelo NI USB-6008 puede alcanzar frecuencias de muestreo de hasta 10 kHz cuando se capturan bloques de datos, en el caso de captura de una única muestra la frecuencia de muestreo máxima es de 150 Hz. Para el modelo LabJack U12 la frecuencia de muestreo máxima cuando se capturan bloques de datos es de 8192 Hz y para una sola muestra de 50 Hz. El costo de ambas tarjetas de adquisición de datos en Estados Unidos, al momento de escritura de este artículo, es de US\$185 para el modelo NI USB-6008 y de US\$129 para el modelo LabJack U12. Debe tenerse en cuenta que la captura usando bloques de datos es útil cuando se trata de sistemas de instrumentación, sin embargo, para el caso de sistemas de control en tiempo real se requiere procesar una muestra al tiempo de tal forma que no se introduzca un retardo de transporte indeseado (Burns et al., 2003) considerando lo anterior, en el contexto de los sistemas de control en tiempo real el indicador de interés es la frecuencia de muestreo máxima de una única muestra (40).

Un sistema de adquisición de señales utiliza un micro computadora e incorpora una diversidad de cada adaptador de monitoreo que produce una señal eléctrica que identifica la condición física de los aparatos a monitorear. Las señales eléctricas son alimentadas por diversos equipos y un convertidos analógico – digital dentro la microcomputadora que es equipado con un medio de impresión. El sistema es tal que el nivel de una o todas las señales desde el respectivo canal de monitoreo puede ser impresa tan bien un cambio en la condición de cualquier señal. Significa que se han incorporado dentro del computador para calcular e imprimir la dirección de una sucesión de señales almacenadas desde cualquier canal de monitoreo que indicaría un problema de mal funcionamiento de un equipo (40).

La adquisición de datos involucra varias señales desde los dispositivos de medición y digitaliza la señal para almacenarlas, analizarlas y presentarlas en una PC, Fig. 61. El sistema de adquisición de datos (DAQ) viene en diferentes formas técnicas para la PC

dando una gran flexibilidad al momento de seleccionar el sistema. Científicos e ingenieros pueden seleccionar formas como PCI, PXI, PCI express, PXI expres, PCMCIA, USB, Wireless and Ethernet adquisición de datos para pruebas, mediciones y aplicaciones de automatización. Hay cinco componentes para ser considerado para ser considerados cuando construyen un sistema básico de adquisición de datos (40):

- Transductores y sensores
- Señales
- Acondicionamiento de señales
- DAQ hardware
- Driver y aplicación de software.

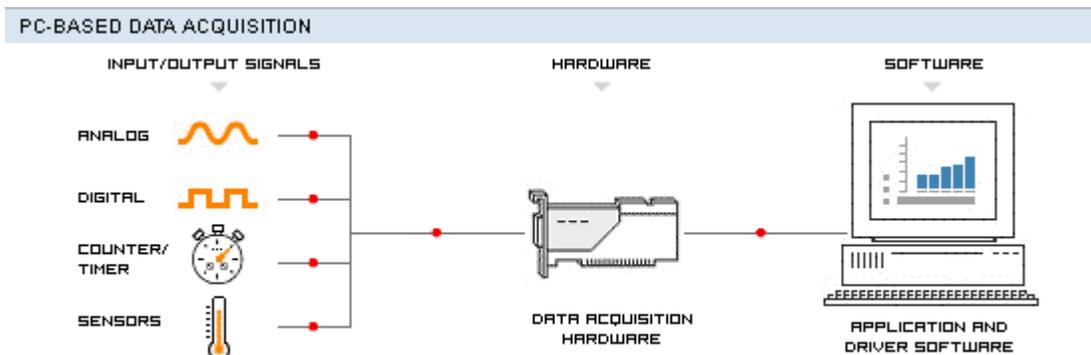


Fig. 61 Sistema de adquisición de señales (40).

3.2.8.1. Lógica difusa

La lógica difusa ha cobrado una fama grande por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico. De hecho, desde hace ya, al menos, década y media, la expedición de patentes industriales de mecanismos basados en la lógica difusa tiene un crecimiento sumamente rápido en todas las naciones industrializadas del orbe.

Se ha considerado de manera general que el concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. (41) .

Las lógicas difusas, pues de hecho hay que hablar de ellas en plural, son esencialmente lógicas multivaluadas que extienden a las lógicas clásicas. Estas últimas imponen a sus enunciados únicamente valores falso o verdadero. Bien que éstas han modelado satisfactoriamente a una gran parte del razonamiento “natural”, es cierto que el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son “tan deterministas”.

Las lógicas difusas procuran crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales. El adjetivo “difuso” aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no-deterministas utilizados en ellas tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre (41)

3.2.8.2. Redes neuronales

Una red neuronal es un procesador distribuido en paralelo, que puede filtrar y procesar la información y tomar una decisión, una red neuronal se parece al cerebro en dos ideas básicas:

- La red necesita una cantidad de información para entrenarse.
- Las conexiones entre las neuronas se usan para almacenar la información.

El uso de las redes neuronales ofrecen muchas propiedades y capacidades, como el aprendizaje adaptativo, auto-organizativas, funcionamiento en paralelo en tiempo real y tolerancia de fallos por la codificación redundante de la información. Desde un punto de vista de solucionar problemas, las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales, mientras que las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y también pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no estaban incluidos durante el proceso del diseño, las redes neuronales pueden procesar la información más rápido que los ordenadores convencionales, pero tiene la desventaja de que no pueden seguir respuestas paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador por lo que no resulta fácil detectar los errores.

Las funciones de activación de las redes neuronales, general mente son funciones sinusoidales y lineales como programación hacia adelante.

- Función escalón de conexión o desconexión: esta función define frecuentemente denominada escalón de dos posiciones (si o no). La salida de esta función es, o bien una constante positiva, una constante negativa o cero.
- Función de saturación lineal: Es similar a la función de escalón de conexión o desconexión, salvo que en un rango determinado de la variable de entrada. La salida tiene un comportamiento proporcional.
- Función sinusoidal asimétrica: es una función binaria, continua y diferenciable en todo su dominio.
- Función sinusoidal simétrica: Esta función también denominada tangente hiperbólica, es completamente diferenciable en todo su dominio, monótonamente creciente y posee una característica bipolar.
- Función lineal: Esta función posee una característica tipo lineal, la cual no tiene límites en su rango.

La arquitectura de las redes neuronales se refiere a la forma de interconexión de las mismas para desarrollar los diferentes procesos con la información recopilada. Pueden existir un sinnúmero posible de combinaciones, sin embargo se pueden definir algunas estructuras fundamentales como en Fig. 62, Fig. 63:

- Redes neuronales artificiales de propagación hacia adelante.
- Redes de Hopfield.
- Redes neuronales artificiales de propagación con retardos de tiempo.
- Redes neuronales artificiales de respuesta de impulso finito

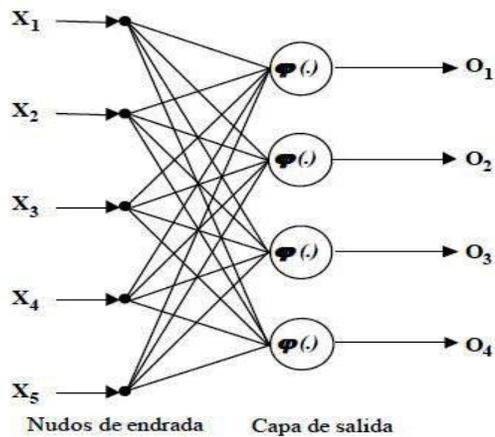


Fig. 62 Red de programación de una capa

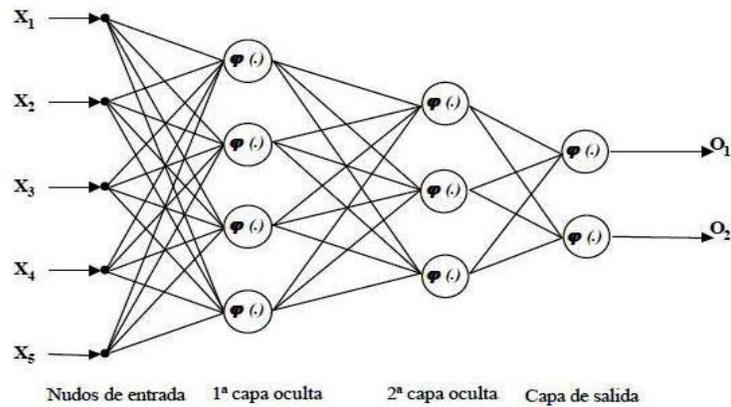


Fig. 63 Red de programación multicapa

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE TAREAS Y DISEÑO DE SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

El diseño es un proceso iterativo y complejo el cual requiere de una retroalimentación periódica hacia las etapas anteriores a fin de reconsiderar aspectos que inicialmente fueron omitidos o que pudieron ser definidos de una mejor manera.

Con este propósito se siguió la secuencia marcada por el GRAFCET, el cual se muestra en la Fig. 47.

Uno de los estudios base para realizar el diseño del sistema, fue el QFD (*Quality Function Deployment*), el cual brinda las siguientes características:

Identificación de las necesidades del cliente

Esta identificación se basó en la valoración de las características cualitativas que el usuario y/o cliente del sistema necesita arrojándonos las principales necesidades que debe de satisfacer el sistema como son:

- Cumplimiento de las normas internacionales.
- Precisión en el control, monitoreo y registro de parámetros.
- Fácil operación del sistema.
- Insumos que presenten una fácil adquisición y ensamble.
- Apariencia.

Este estudio arrojó como principales prioridades:

El cumplimiento de los estándares de trabajo, bajo el sistema internacional.

Establecimiento de metas de diseño

Al analizar los resultados del estudio QFD, se definieron los subsistemas de los cuales estará comprendida la máquina, estos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15 Metas de diseño

Subsistema	Variable principal	Observaciones
Carga	Carga aplicada, kgf	Precisión, adaptabilidad y monitoreo en tiempo real.
Temperatura	Temperatura del material lubricante, °C	Precisión, adaptabilidad y monitoreo en tiempo real.
Velocidad	Giro de la probeta, RPM	Precisión, cumplimiento y control.
Registro de datos	Datos del operario. Datos del material lubricante. Parámetros de prueba. Comportamiento de las variables principales durante el proceso.	Precisión, claridad y puntualización de la información contenida
Visualización (interfaz H-M)	Compendio de variaciones en el sistema. Agilidad de trabajo. Precisión de captura.	Visualización y manejo del sistema con forme a una usabilidad elevada.
Monitoreo	Visualización en tiempo real. Precisión. Definición.	Correcta transferencia de valores y cambios de estado del sistema.

Tomando en cuenta los datos mostrados, en este capítulo se presentan, tanto las funciones generales de una máquina de ensayos tribológicos basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas en pruebas de extrema presión y no extrema presión. Así como los diferentes sistemas que lo integran.

Para la construcción de estos sistemas. Se puntualizó en el cumplimiento de las necesidades plateadas en el análisis de tareas, se desarrollaron diversos elementos, los cuales mostraron las principales características de funcionamiento y puntualizaron las características del diseño desarrollado.

4.1 Análisis de tarea

Este análisis cumple con la *fase de explotación* o primer paso de diseño definido por el GRAFCET.

4.1.1 Desglose de tareas

El funcionamiento de la máquina de ensayos tribológicos se basa en normas internacionales, las cuales definen los parámetros necesarios que involucran los diferentes elementos. Estas pruebas son desarrolladas tanto a aceites como a grasas.

4.1.1.1 Pruebas de no extrema presión

Se define “Prueba de no extrema presión” al ensayo tribológico desarrollado en una máquina de pruebas basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, la cual tiene como objetivo, el determinar la marca resultante por contacto rotativo deslizante, lubricado

por un material definido ya sea grasa o aceite, el cual forma una película entre las probetas, como se muestra en la Fig. 64.

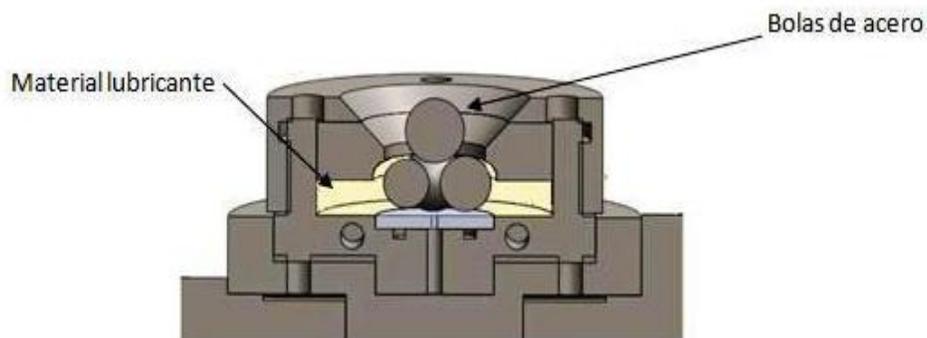


Fig. 64 Elementos de prueba

ASTM D2266

- Esta norma rige la prueba de no extrema presión cuando el material lubricante es una grasa, mostrando los parámetros a los cuales se realizara el ensayo, estos se muestran en la Tabla 16 (42):

Tabla 16 Prueba de grasas lubricantes (ASTM D2596)

Prueba de grasas lubricantes (ASTM D2596)	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2"]
Fuerza de compresión	40 ± 0.1kgf (392 ± 2 N)
Temperatura de inicio	75 ± 2 °C (167 ± 4°F)
Velocidad de prueba	1200 ± 60 rpm
Duración de la prueba	60 ± 1 min

ASTM D4172

- Esta norma rige la prueba de no extrema presión cuando el material lubricante es un aceite, mostrando los parámetros a los cuales se realizara el ensayo como se muestra en la Tabla 17 (43):

Tabla 17 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D4172)

Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D4172)	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2"]
Fuerza de compresión	15 ± 0.2 kgf (147 ± 2 N)

	40 ± 0.2 kgf (392 ± 2 N)
Temperatura de inicio	75 ± 2 °C (167 ± 4 °F]
Velocidad de prueba	1200 ± 60 rpm
Duración de la prueba	60 ± 1 min

Después de realizada, se mide por medio de microscopio la marca dejada en la esfera superior, para así determinar la calidad del lubricante con respecto al tamaño de daño sufrido en la probeta.

DIN 51350

- Esta norma define ensayos tribológicos de no extrema presión a polímeros lubricantes derivados del petróleo, utilizando una máquina de ensayos tribológicos. Para ello se precisan los siguientes parámetros como se muestra Tabla 18 (44):

Tabla 18 Prueba bajo la norma DIN

Prueba de fluidos lubricantes (DIN 52350)	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2"]
Fuerza de compresión	5 000 N
Temperatura de inicio	60 ± 1 °C
Velocidad de prueba	1450 rpm
Duración de la prueba	4 hrs 8 hrs 20 hrs

4.1.1.2 Prueba de extrema presión

La prueba definida como de “*Extrema presión*”, como su nombre los dice, se dedica al estudio del comportamiento de los lubricantes bajo condiciones de de carga elevada. Este ensayo se desarrolla con una máquina de ensayos tribológicos. Al igual que en la prueba de no extrema presión, este ensayo se realiza tanto a grasa como a aceites lubricantes.

El objetivo de esta tarea es verificar la carga a la cual la fuerza de fricción es lo suficientemente elevada para generar soldadura en frío entre las probetas del arreglo, para localizar este punto, la norma en especifica una serie de 22 pasos (los cuales están definidos por el incremento en la carga que van desde 6 hasta 800 kgf), verificando en cada uno de ellos, las marcas dejadas en las probetas que forman la base del arreglo tetraédrico para verificar el comportamiento del material lubricante.

ASTM D2596

- Esta norma establece las condiciones y parámetros del ensayo de extrema presión a lubricantes grasos, así como los lineamientos para interpretar los resultados obtenidos. Para ello se definen los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 19 (45):

Tabla 19 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2596)

Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2596)	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2"]
Fuerza de compresión	Incremental
Temperatura de inicio	27 ± 8 °C (80 ± 15 °F)
Velocidad de prueba	1770 ± 60 rpm
Duración de la prueba	10 ± 2 seg

ASTM D2783

- Esta norma establece las condiciones y parámetros del ensayo de extrema presión a aceite lubricantes, así como los lineamientos para interpretar los resultados obtenidos. Para ello se definen los siguientes parámetros, los cuales se muestran en la Tabla 20 (46):

Tabla 20 Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2783)

Prueba de fluidos lubricantes (ASTM D2783)	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2"]
Fuerza de compresión	Incremental
Temperatura de inicio	De 18 a 35 °C (65 a °F)
Velocidad de prueba	1760 ± 40 rpm
Duración de la prueba	10 ± 2 seg

4.1.1.3 Prueba no normalizada

Aun que las normas establecen un amplio margen de definición tanto de la prueba de extrema presión como de no extrema, existen aplicaciones específicas para las que es necesario realizar pruebas que definan las propiedades de un lubricante. Para ello se

desarrollo una prueba nombrada como “*No normalizada*”, la cual, manipulando las variables descritas por las normas, se obtiene una representación más precisa de las condiciones de trabajo, estos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21 No normalizada

No normalizada	
Diámetro de la probeta	12.7mm [1/2”]
Fuerza de compresión	No incremental Carga < 1000 kgf
Temperatura de inicio	T < 100 °C
Velocidad de prueba	1760 ± 40 rpm, 1450 ± 40 rpm, 1200 ± 60 rpm
Duración de la prueba	Ti < 4 hrs

4.1.2 Proceso de prueba

Las diferentes pruebas desarrolladas en una máquina de ensayos tribológicos basado en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, se componen de las mismas operaciones, las cuales definen el proceso.

El proceso puede ser especificado por:

- Preparación de probetas: Esta actividad engloba las operaciones necesarias tanto de preparación de la prueba como las de revisión de la máquina, el acomodo y proceso por el cual las probetas son preparadas para la ensayo (esta operación es similar para todos los ensayos), mas las operaciones tanto de revisión como de puesta en marcha dependen del modelo de máquina que se esté utilizando.
- Prueba: Las operaciones involucradas, son básicamente las mismas para cualquier tipo de equipo, lo único en lo que difieren la secuencia de los parámetros de operación a las que son realizadas.
- Tratamiento de datos: En esta etapa, se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos en la prueba, verificando y comparándolos con las normas ya establecidas.

Este trabajo se concentra en la ilustración de los sistemas que definen el control de una máquina de ensayos tribológicos basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas. El estudio se baso en el método GRAFCET, el cual enmarca una serie de actividades para la descripción del sistema, las cuales se muestran a continuación.

4.1.2.1 Desarrollo del sistema

En esta fase se delimitan las operaciones comenzando desde una visión general hasta los parámetros particulares de funcionamiento del sistema de control.

Diagrama funcional

En esta etapa se especificaron las actividades que engloban el funcionamiento del sistema, de forma tal que describa a grandes rasgos el proceso por el cual las funciones del ensayo son desarrolladas, esto se ejemplifica en la Fig. 65.



Fig. 65 Diagrama funcional

Este diagrama nos muestra la sucesión de cuatro actividades generales, así como las condiciones que confirman tanto el desarrollo como el término de cada una de ellas. Ya que el sistema se desarrolla de forma secuencial, se define un retorno, el cual ofrece la opción de continuar con una nueva prueba (Para pruebas de extrema presión se muestra una secuencia definida de pruebas) o finalizar las actividades en la máquina.

Definición de macro etapas

Este diagrama mostrado en la Fig. 66 ejemplifica las operaciones en las cuales incurre cada una de las tareas mostradas en el diagrama de funciones. Este define de forma precisa, la secuencia de tareas así como su relación con el proceso general del sistema.

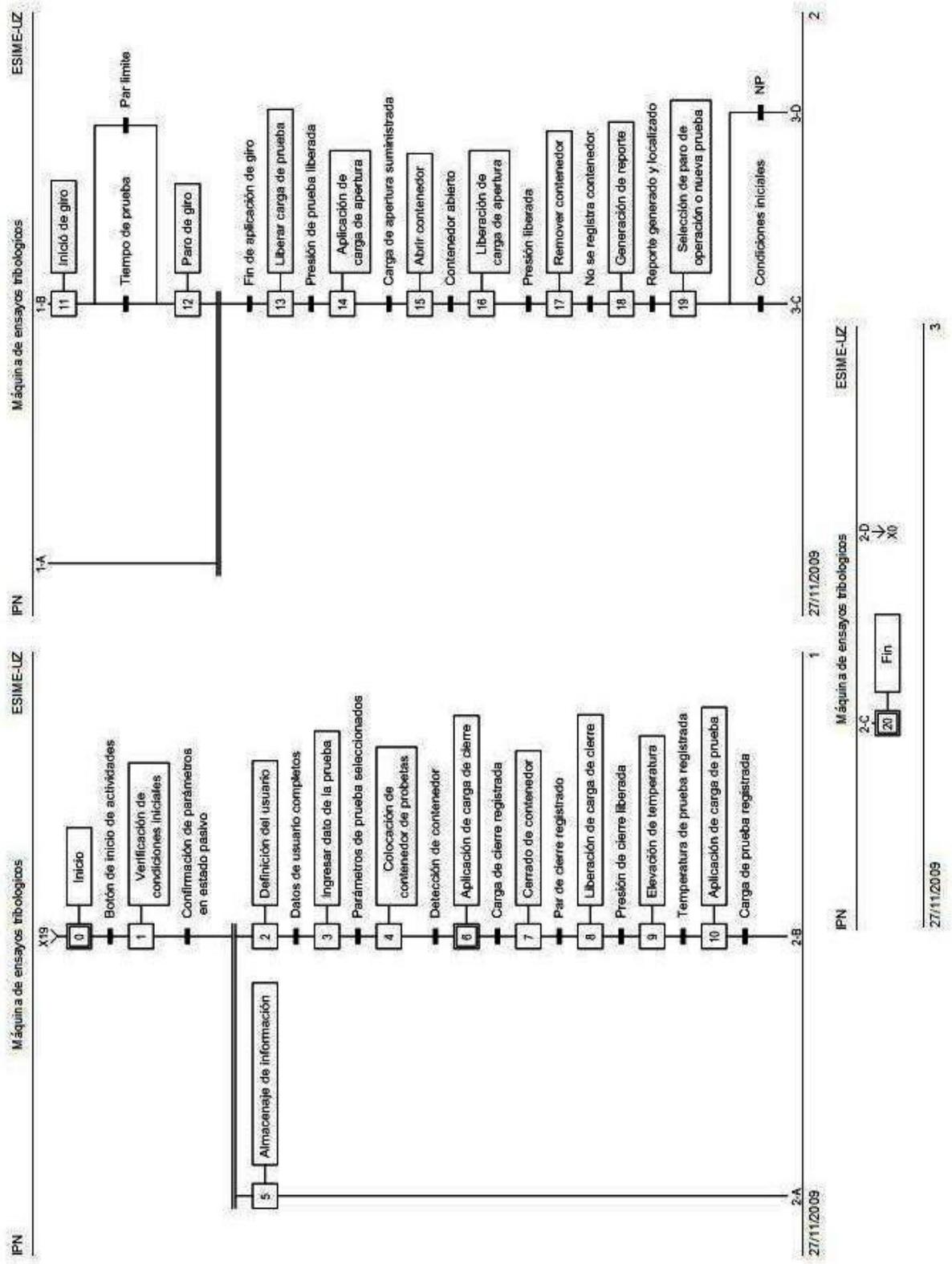


Fig. 66 Diagrama de Macro Etapas

Después de observar el sistema de control de forma general e ir definiendo las necesidades del sistema, por lo que es necesario especificar las actividades de cada una de las operaciones. Esto implica describir las tareas como elementos lógicos y variables definidas, para así realizar el proceso de control como una función combinada entre activadas, operaciones y tareas, con el comportamiento de las variables presentes en cada una de ellas.

Descomposición de macroetapas en etapas simples

El despliegue las diferentes actividades que desempeña el sistema, confieren una combinación entre elementos activos y de registro, lo cuales desarrollan el proceso. Para definir estas funciones, así como la combinación de las mismas de forma que se realice las diferentes tareas de forma secuencial y correcta, se creó el GRAFCET técnico, el cual se combina la operación con la variable de activación. Este se muestra en el Anexo A.

4.1.3 Definición de sistemas programables

Para puntualizar de manera clara las diferentes partes integrantes del sistema de control, se precisaron diferentes sistemas. Para ello se tomo en cuenta las operaciones integrantes del proceso y su relación entre sí, por lo cual se muestran los siguientes sistemas:

4.1.3.1 Sistema de registro de datos

El objetivo de este sistema es el de recabar y cargar los datos necesarios tanto para el desarrollo de la prueba (dependiendo de la norma seleccionada), así como del usuario.

Esto define las siguientes operaciones que debe de satisfacer el sistema:

- Definir el usuario.
- Especificar las características del material.
- Delimitar los parámetros de la prueba.
- Almacenamiento de datos para su posterior uso.
- Ingreso fácil de parámetros.

Para esto se desarrollo el proceso, el cual se observa en la Fig. 67:

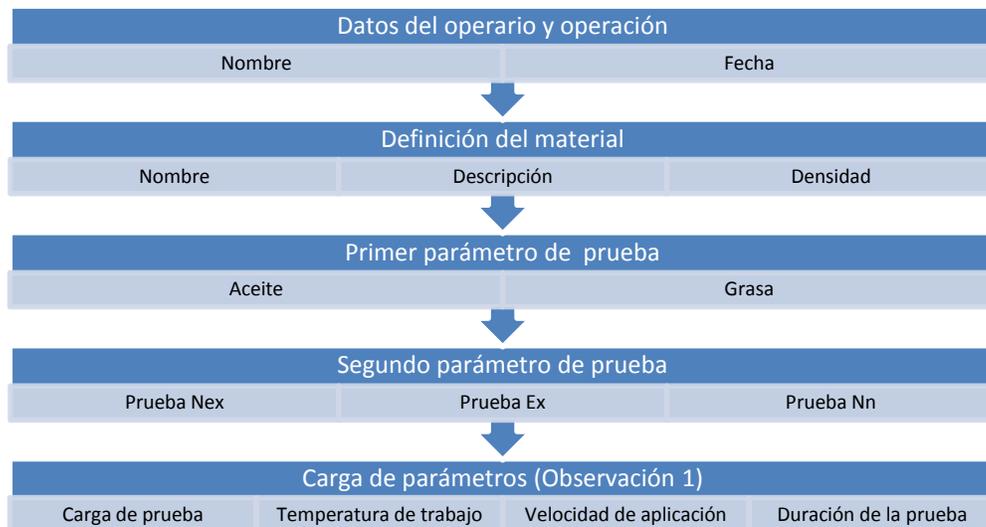


Fig. 67 Sistema de registro de datos

Observación 1: Los valores que correspondientes a cada una de las pruebas que es posible realizar la mayoría ya están preestablecidos (excepto por los parámetros de las no normalizadas, los cuales son introducidos por el usuario), por lo que la actividad que se realiza solo es de verificación. Pero en otros casos, para realizar los ensayos, algunos de los parámetros deben de ser seleccionados o determinados por completo.

Por la naturaleza de trabajo del sistema, este se desarrolla completamente en un ambiente virtual, por lo que las funciones de carga de parámetros como de almacenamiento de datos de trabajo, se especifican en un proceso programable y específico en apartados posteriores.

4.1.3.2 Sistema operativo

Este sistema integra las operaciones que se realizan en todas las pruebas, solo diferenciado por los valores que las controla (tiempo, carga, velocidad o temperatura).

Para la completa definición de este sistema, se desarrollara una serie de sub-sistemas, lo cuales expliquen de una manera clara el funcionamiento de cada una de las operación que delimitan el sistema. Estos elementos se muestran a continuación:

- Sub-sistema de caga

Este sub-sistema, se encarga del suministro y control de la fuerza requerida para realizar el ensayo, teniendo como objetivo primordial el proporcionar de forma precisa, el parámetro.

En la realización del ensayo, se realizan las siguientes operaciones, para las cuales el sub-sistema de carga fue diseñado:

- Aplicación de carga de forma precisa.
- Control de la aplicación y conservación de la carga durante la prueba.
- Sistema de apagado en caso de error.
- Seguridad para el usuario y el sistema.

Entre los parámetros de la prueba, este es uno en los que se debe de tener mayor prioridad, tanto en su precisión, como en su generación.

Las actividades que este sub-sistema desarrolla se definen en el cuadro operativo mostrado en la Fig. 68:

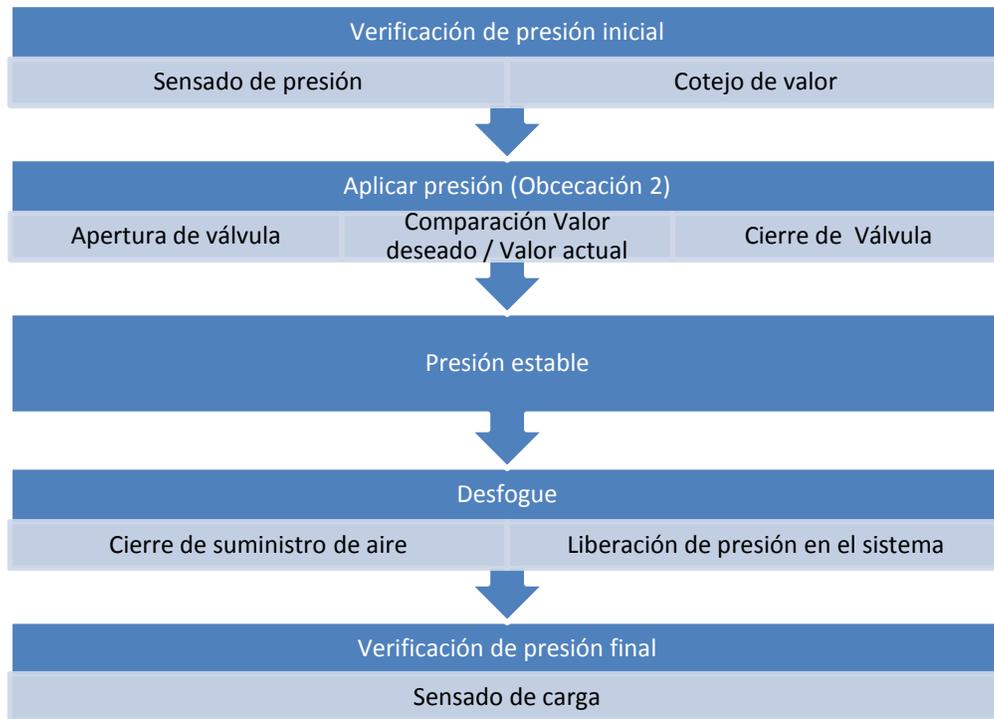


Fig. 68 Sub-sistema de caga

- Sub-sistema de temperatura

Este sub-sistema, tiene como objetivo, el mostrar y controlar la temperatura en el valor requerido para cada ensayo. Este sub-sistema, se implemento para establecer la temperatura inicial de la prueba, así como para mantenerla durante el transcurso de la misma.

Las principales tareas que debe de cubrir este sistema son:

- Elevar la temperatura del material de ensayo.
- Calibración de subsistema.
- Precisión del sistema.
- Sensado de la temperatura a cada momento de la prueba.
- Monitoreo de las actividades.
- Visualización de las variaciones de temperatura en el sistema.

Para esto, se sigue el diagrama de operación mostrado en la Fig. 69:

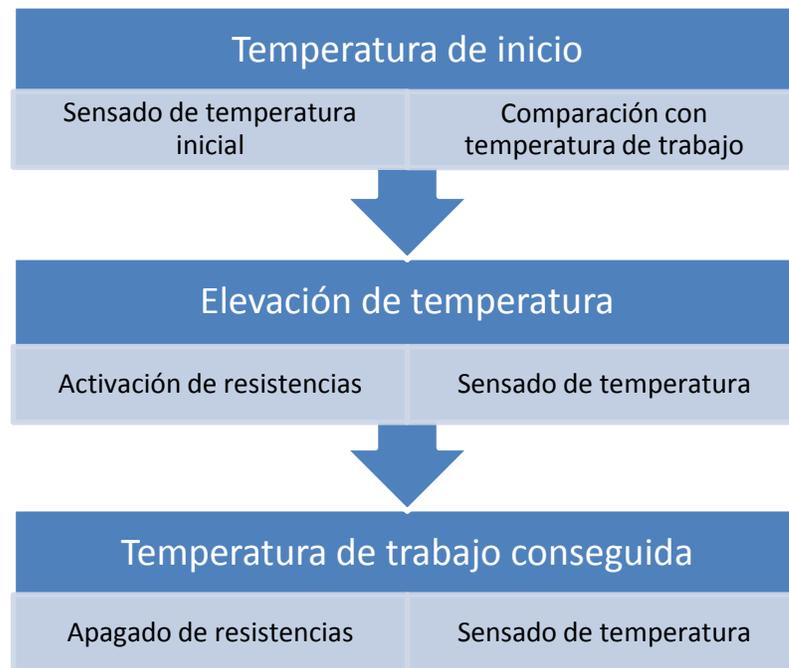


Fig. 69 Sub-sistema de temperatura

Esta operación no es desactivada hasta finalizar el ensayo, ya que si es necesario se activan las resistencias para incrementar la temperatura, para que las condiciones de experimentación se mantengan, este sistema será capaz de detectarla, así como optimizar la temperatura del proceso.

Nota: El proceso de control térmico, está dirigido, solo a incrementar la temperatura, por las siguientes razones:

1. La temperatura de trabajo de las diferentes pruebas, están sobre la temperatura ambiente
2. Si durante la prueba, la temperatura se eleva sin sobrepasando la temperatura de trabajo especificada sin que el sistema esté involucrado, este incremento se debe al fenómeno desarrollado por la actividad del ensayo, por lo que este es relevante para determinar el comportamiento del material lubricante.
 - Sub-sistema de velocidad

Este sub-sistema, está encargado de activar o desactivar el funcionamiento del motor. Este sistema mantiene las siguientes características:

- Tener una variación de velocidad, la cual cubra las pruebas normalizadas.
- Calibración de subsistema.
- Aplicar el par necesario para el cumplimiento de la prueba.
- Monitoreo del par generado.

Para satisfacer estas necesidades, se definió el diagrama operativo mostrado en la Fig. 70:

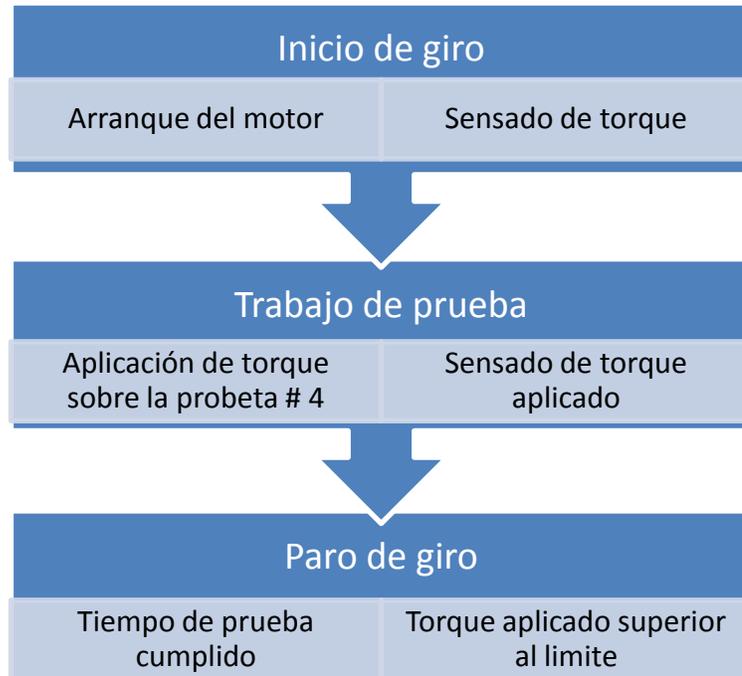


Fig. 70 Sub-sistema de aplicación de giro

- Sub-sistema de par

Este sub-sistema, es el encargado de registrar el par que se genera durante la prueba, ya sea por acción manual, así como, el resultante del contacto entre al arreglo de probetas durante la prueba.

Este sistema, registra uno de los principales fenómenos para los cuales está destinada la máquina por lo que es necesario cumplir con los siguientes aspectos:

- Precisión de medición.
- Registro eficiente.
- Facilidad de comparación.
- Seguimiento en tiempo real.

Para esto se definió el proceso de operación mostrado en la Fig. 71:

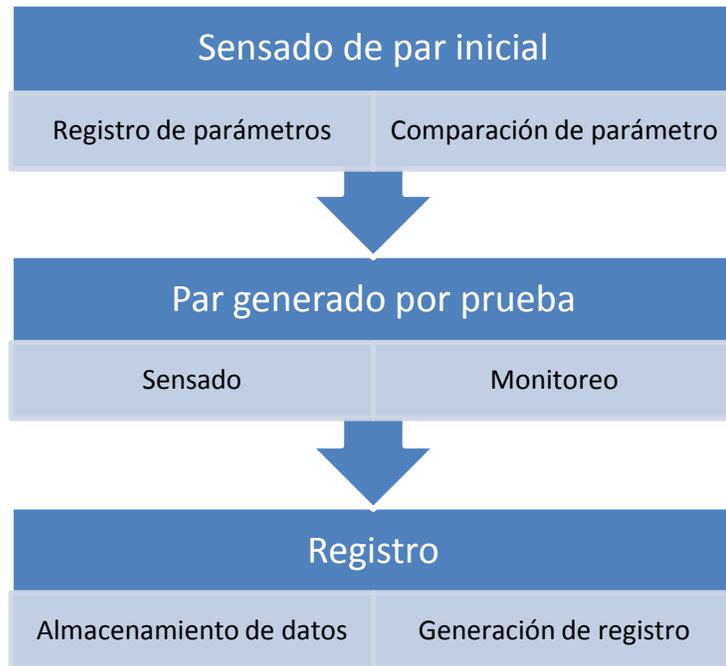


Fig. 71 Sub-sistema de par

Este sub-sistema está delimitado solo por el registro del dato prioritario de la prueba, el cual a su vez sirve como interruptor para realizar otras funciones en el sistema general.

- **Sub-sistema temporal**

Este sub-sistema, trabaja y se controla desde el programa del autómat. Este se encarga de regular el tiempo de acción así como la dirección de diferentes funciones.

Este sistema por sus características debe de cumplir con los siguientes parámetros:

- Precisión del sistema.
- Delimitación clara de duración y espera de acciones.
- Seguro contra errores.
- Registro confiable.

Para este sub-sistema, no se desarrolló un diagrama de proceso, ya que su actividad puede ser desde una señal de error (la cual dure una hora), hasta la duración de una prueba completa (un máximo de 12 hrs).

Sistema de reporte

Este sistema está dirigido a realizar la retroalimentación y visualización de los datos generados por la prueba, este proceso cubre desde el instante en que se da inicio al sistema (proporcionado fecha y hora), hasta la remoción del contenedor de la máquina.

Este sistema deberá cumplir con las siguientes tareas con el objeto de definir de una forma completa la prueba que se desarrolla en la máquina:

- Definición precisa de los datos principales.
- Precisión en el registro de las variables relevantes.

- Facilidad de entendimiento.
- Generación de reporte en un programa adecuado para su lectura.
- Puntualización de los errores incurridos durante el periodo de prueba.

Para esto, el sistema de registro se basa en un proceso en marcado como se muestra en la Fig. 72:

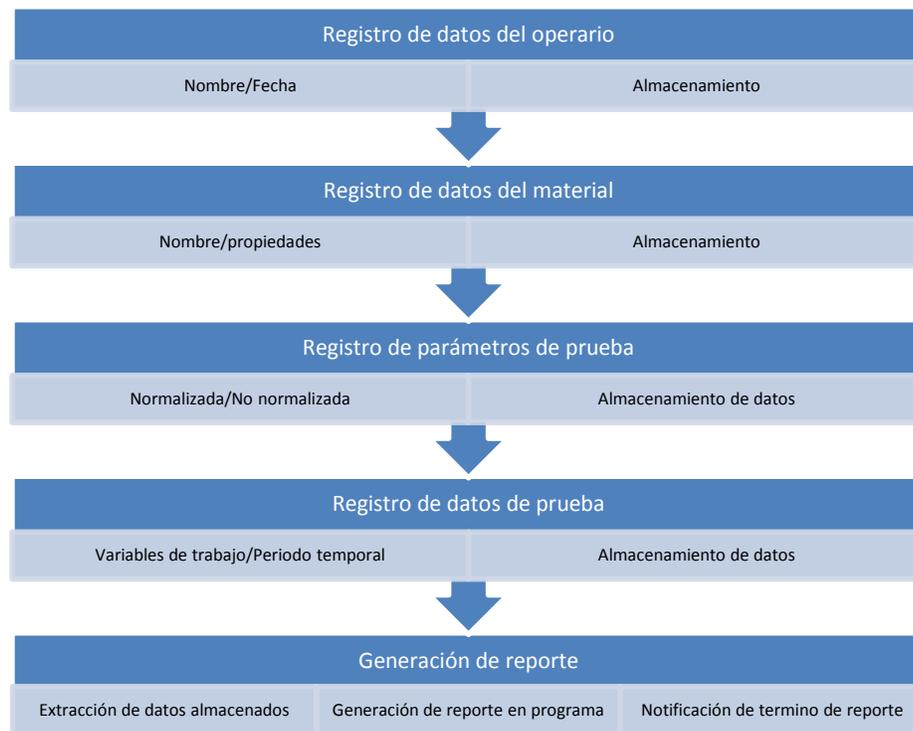


Fig. 72 Sub-sistema de registro

Este sistema, es parte fundamental, ya que un que se cuenta con una visualización en tiempo real del progreso de la prueba, esté nos genera una base de datos capas de ser utilizada como comparación y/o revisión cotejándola con parámetros y estándares normalizados, así como general un registro de la evolución de diferentes pruebas desarrolladas para un mismo material.

4.1.3.3 Muestreo

Para conocer el progreso de un proceso o tarea, es esencial el conocimiento y monitoreo de las principales variables que lo conforman. Para ello es necesario identificar los principales elementos que al modificar su valor impacten de manera directa en el comportamiento del sistema. Un ensayo de cualquier índole trata de simular las condiciones de trabajo de una operación, mecanismo y/o elemento, controlando las variables que lo afectan. Para una ensayo tribológico de cuatro bolas, los parámetros que delimitan la evolución de la operación son:

- Tiempo
- Temperatura
- Velocidad
- Carga
- Par

Después de la identificación de los principales parámetros, el monitoreo de las variables es fundamental por lo que es necesario un intervalo temporal entre el sensado y captura de parámetros relativamente cortos, lo cual represente en tiempo real del proceso en curso. Para este proyecto se utiliza un tiempo de registro de 0.5 segundos controlado por la tarjeta de adquisición de datos, este ofrece una visión clara de la evolución del ensayo

Sin embargo el tiempo de registro seleccionado conlleva una dificultad ya que la normatividad delimita pruebas que duran desde 10 segundos hasta 20 horas, y con los ensayos no normalizados, las cuales pueden ser desde 10 segundos hasta 2 horas, por lo que se decidió que el tiempo de registro sea diferente al tiempo de muestreo.

El principal objetivo del muestreo es el de representar con una porción de la población el comportamiento o características que la definen. En el proyecto se desarrollo la ecuación 70, la cual dependiendo del tiempo de duración de la prueba, se determinará el intervalo de temporal para el muestreo, el cual dará el número de valores que se publicaran en el reporte final. El comportamiento de esta se describe en la Fig. 73.

$$t_m = \frac{1}{t} [(4 \times 10^{-12} * t^3) - (3 \times 10^{-7} * t^2) + (0.0285 * t) + 29.714]$$

70

donde:

t_m Tiempo de muestreo

t Duración de la prueba

El comportamiento de esta función se representa en la Fig. 73:

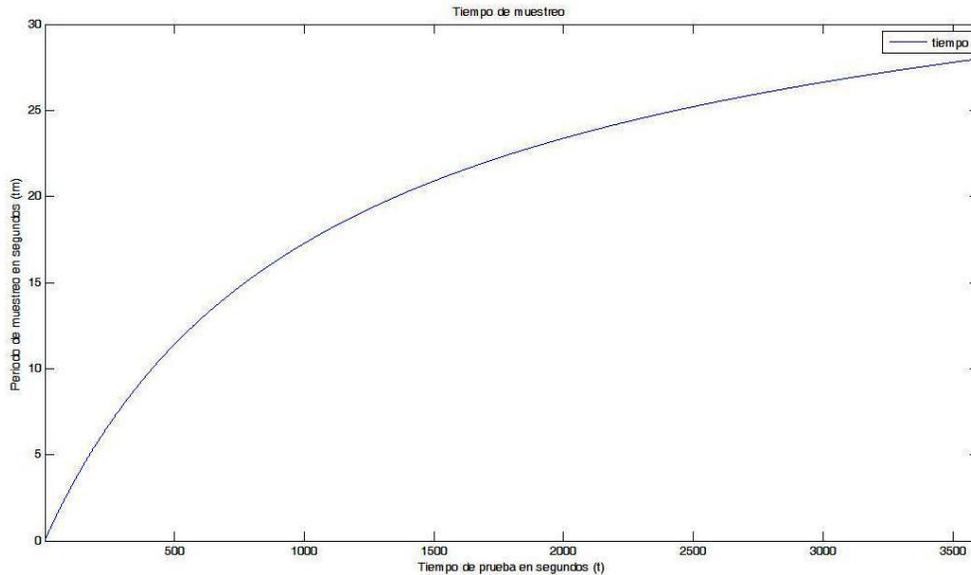


Fig. 73 Comportamiento de la ecuación que rige el tiempo de muestreo

4.2 Diseño de Sistemas de Transferencia de Energía

EL diseño del STE de los diferentes subsistemas que involucra el mecanismo, es la base de la *fase de diseño* que el GRAFCET marca para el desarrollo de un sistema de control.

4.2.1 Sistema de Transferencia de Energía: Aplicación de carga

El objetivo de este sistema es el transmitir una carga lineal y controlable, la cual cuente con un rango de trabajo entre 8 a 1000 Kg-F. Para esto se existen diversos métodos, los cuales nos ofrecen ventajas y desventajas en uso como son:

- Mecánico: Se genera una carga lineal, con forme a un sistema de palanca, la cual con la colocación de diferentes pesos en puntos previamente calculados, nos proporcionan diferentes cargas.
 - Ventajas: Constancia en la aplicación de carga, simplicidad en el diseño, insumos fáciles de adquirir, simplicidad en el cálculo de la carga a aplicar, no necesita de un suministro de energía externo, economía y accesibilidad de los elementos necesarios para su construcción.
 - Desventajas: Control limitado de la carga, espacio funcional elevado, limitación en selección de carga de trabajo.
- Hidráulico: En este sistema, se genera una carga lineal, conforme a la regulación del flujo de aceite. Este flujo es suministrado bajo una presión controlada, la cual es regulada y enviada a un actuador. Al introducir el flujo en el actuador, este genera un movimiento lineal uniforme, el cual genera una carga controlada (47).

- Ventas: Fácil control de proceso, rango de trabajo elevado, precisión de aplicación, eficiente transmisión de potencia, variación mínima de la carga de aplicación.
- Desventajas: Necesidad de un abastecimiento constante de aceite, elementos de conexión y trabajo relativamente costosos, sensibilidad a la suciedad.
- Neumático: en estos sistemas, se genera, ya sea un movimiento lineal el cual aplica una carga en sentido axial al centro del vástago. La presión así como el área de aplicación definen la carga que se aplica.
 - Ventaja: bajo coste, facilidad de mantenimiento, alta prestaciones, elevada relación potencia-peso.
 - Desventajas: funcionamiento no lineal debido a la compresibilidad del aire, presencia de fenómenos de fricción, utilización de válvulas no lineales (39).

4.2.1.1 Subsistema neumático

El sistema neumático fue seleccionado para la aplicación de carga ya que brinda una precisión elevada así como un control y adaptable. La tarea de aplicación de carga sigue el ciclo de trabajo mostrado en la Fig. 74 y definido en su acondicionamiento de control en la Fig. 75.

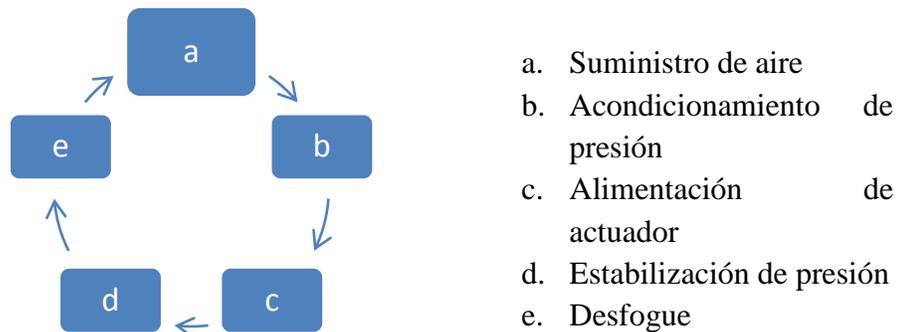


Fig. 74 Ciclo del sistema de carga

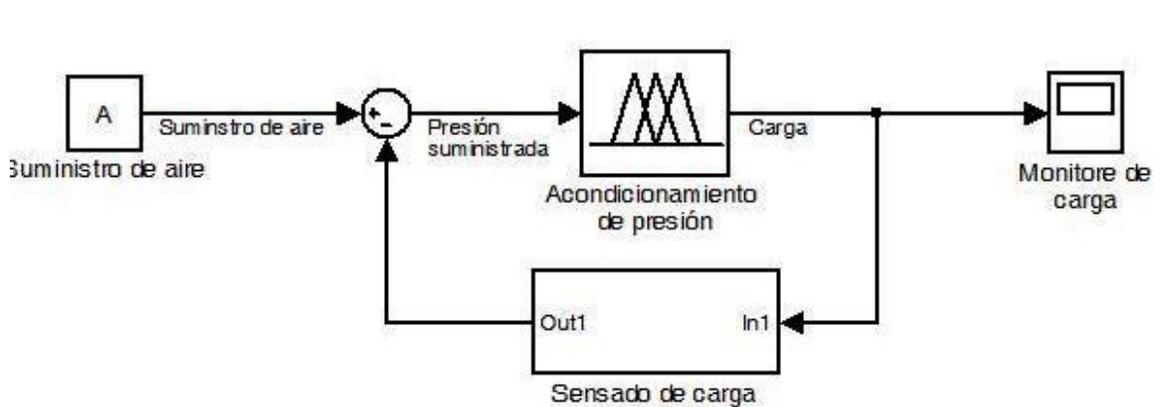


Fig. 75 Ciclo de control de carga

Definición de operaciones:

Suministro: El suministro de aire comprimido para instalaciones neumáticas comprende:

- La producción de aire comprimido mediante compresores.
- Acondicionamiento del aire comprimido para las instalaciones neumáticas.
- Conducción del aire comprimido hasta los puntos de utilización.
- Compresor:

El elemento central de una instalación productora de aire comprimido es el compresor. La función principal de un compresor neumático es aspirar aire a presión atmosférica y comprimirlo a una presión más elevada como se muestra en la Fig. 76. Las características técnicas a valorar en los compresores son: Caudal suministrado en Nm^3/min (para compresores pequeños) o en Nm^3/min y por la relación de compresión, siendo esta última la presión alcanzada en bar, kg/cm^2 .

Los compresores se dividen, según el tipo de ejecución, en (48):

- Compresor de émbolo.
- Compresor rotativo.
- Compresor centrífugo.

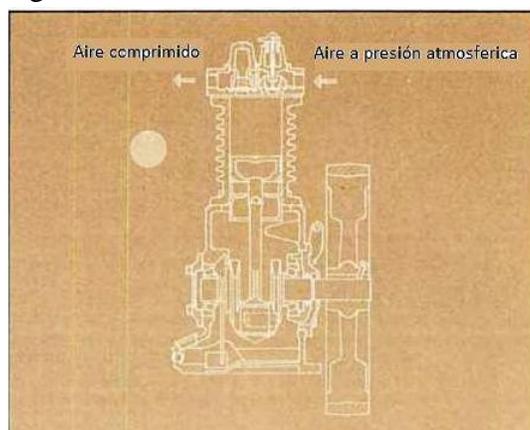


Fig. 76 Compresor

- Acondicionamiento de aire

Se diseñan para eliminar impurezas sólidas y líquidas. Los filtros tienen como objetivo:

- Eliminación eficaz de impurezas, polvo, agua, etcétera.
- Efectuar esta eliminación con la menor pérdida de carga posible, puesto que la pérdida de carga supone desperdicio de aire comprimido.
- Que tengan un mantenimiento y limpieza sencillos.

El aire, al pasar por el filtro, lo hace forzado por un deflector que por centrifugación proyecta contra las paredes las partículas sólidas y líquidas más pesadas, que chocan sobre las paredes del vástago, descendiendo a la parte inferior de éste hasta la zona inferior de la cámara, lo cual se muestra en la Fig. 77.

Después de esta primera separación, el aire atraviesa el vaso de filtrante de plástico o bronce poroso de la finura requerida (5, 10, 25, 40 o más micras) (49).

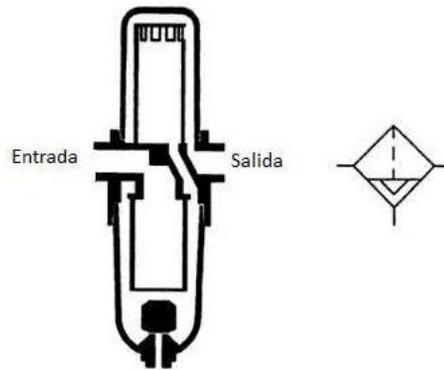


Fig. 77 Vista esquemática del filtro

○ Acondicionamiento de presión

La presión en la línea, debido a las variaciones de carga del compresor y a las diferentes puntas de consumo, puede variar. Para asegurar que la instalación de un regulador de presión es eficiente se deben de considerar los siguientes puntos:

- Regulación en la presión ajustada a pesar de las variaciones de presión que se produzcan en la línea general de alimentación de aire.
- Mayor rendimiento de los elementos neumáticos al alimentarse éstos a su presión óptima de funcionamiento.

El regulador de presión seleccionado tiene las características mostradas en la Fig. 78, se selecciono conforme a las necesidades del subsistema de regulación, estas son:

- Precisión en la regulación de presión.
- Trabajo bajo alimentación de diferentes presiones.
- Control mediante una señal digital.
- Motor de 110 V A C.
- Conexión de aire universal.
- Fácil montaje.
- Accesibilidad de operación.
- Controlada con una señal analógica



Fig. 78 Válvula reguladora

- Modelo Control Air 130
- Tamaño de entrada 1/8"
- Rango de presión 2-120 psi
- Motor 6 RPM, 24 VDC
Reversible, síncrono, transmisión por engranaje, par aproximado de 8 in oz
- Temperatura de trabajo -18 a 140 °C
- Peso 2.75 lb
- Apertura de 0 – 100% 5.5 vueltas

La regulación de la presión, se realizará por medio de su apertura, dependiendo de la carga requerida.

○ Actuador

La automatización de una máquina no acaba con el esquema del automatismo a realizar, sino con la adecuada elección del actuador, sistema de monitoreo y equipo secundario a utilizar que tenga una sincronización adecuada entre todos los subsistemas integrantes. En un sistema neumático los receptores son los llamados actuadores neumáticos o elementos de trabajo, cuya función es la de transformar la energía neumática del aire comprimido en trabajo mecánico.

Los actuadores neumáticos se clasifican en:

- Cilindros
- Motores

Los cilindros neumáticos son por regla general, los elementos que realizan el trabajo. Su función es la de transformar la energía neumática en trabajo mecánico de movimiento rectilíneo, que consta de carrera de avance y carrera de retroceso. Existen diferentes tipos de cilindros neumáticos. Según la forma en que se realiza el retroceso del vástago, los cilindros se dividen en (48):

- Cilindro de simple efecto
- Cilindro de doble efecto

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, el fuelle neumático, puede ser utilizado como un aislante de vibraciones, amortiguador y como actuador. En este proyecto, por sus características, es utilizado como actuador neumático, teniendo como referencia las siguientes propiedades:

El modelo seleccionado para realizar las funciones de este proyecto, se define como se muestran en la Fig. 79, este se selecciono conforme a las siguientes características de uso:

- Aplicación de carga en un margen de 0 a 1500 Kg.
- Actuación lineal y adaptación de posición.
- Control adaptable de la carga a aplicar.
- Estabilización de carga en el punto de trabajo.
- Montaje adaptable.

NUMATICS ASNS51-3-1

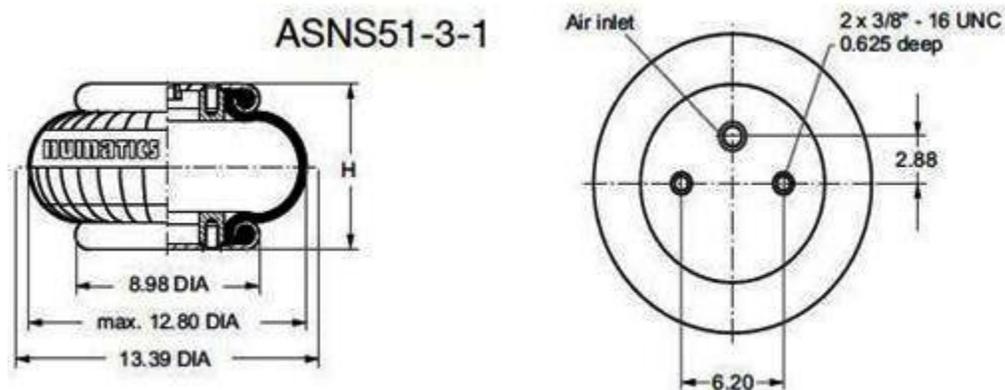


Fig. 79 Actuador neumático

- Elevación: 5.5"
- Volumen: 415 in³
- Fuerza a la presión de trabajo: 3680 lb
- Conexión de aire: 3/4" NPTF

○ Válvulas

Las válvulas de control de dirección, son las que gobiernan el arranque, paro y sentido de circulación del aire comprimido. Su principal objetivo es el de mantener o cambiar, según sea necesario para obtener una salida de acuerdo a la actividad. De acuerdo con su uso, los distribuidores pueden dividirse en los siguientes grupos:

- Distribuidores de potencia o principales.
- Distribuidores fin de carrera.
- Distribuidores auxiliares.

Para este proyecto se utilizaron las válvulas mostradas en la Tabla 22:

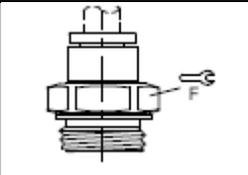
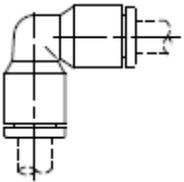
Tabla 22 Válvulas utilizadas en el STE neumático

Válvula	Símbolo	Uso
<p>3/2</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ○ Control de flujo ○ Desfogue
<p>2/2</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ○ Estabilidad de presión ○ Aislamiento

- Equipo de conexión

La transmisión e interconexión de las líneas neumáticas, deben de asegurar una correcta transmisión de presión así como de caudal, asegurando pérdidas y variaciones de presión mínimas, la cuales se bosquejan en la Tabla 23.

Tabla 23 Conexiones neumáticas

Conexión	Nombre
	Conexión recata
	Codo de conexión

Al igual que las conexiones, la manguera es parte primordial de la transmisión.

4.2.1.2 Diagrama de conexiones neumáticas

El diagrama esquematiza, las conexiones realizadas entre los elementos que interviene en el STE neumático. Mostrándonos la relación que guardan cada uno de ellos, así como guía para la conexión física del sistema, lo cual se representa en la Fig. 80, estando integrado

por los elementos en listados en la Tabla 24, con esto se creó el modelo especificado en la Fig. 81.

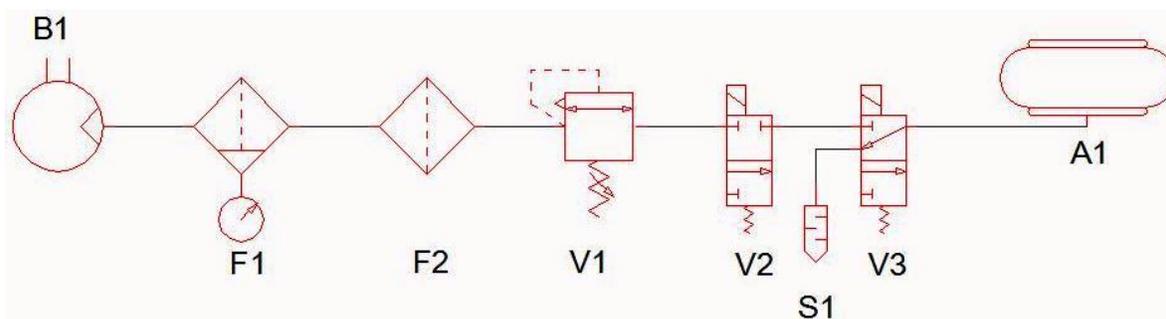


Fig. 80 Diagrama neumático

Tabla 24 Elementos neumáticos

Símbolo	Elemento
B1	Compresor generador
F1	Filtro principal
F2	Filtro secundario a 25 micras
V1	Válvula reguladora
V2	Válvula 2/2
S1	Silenciador
V3	Válvula 3/2
A1	Actuador neumático

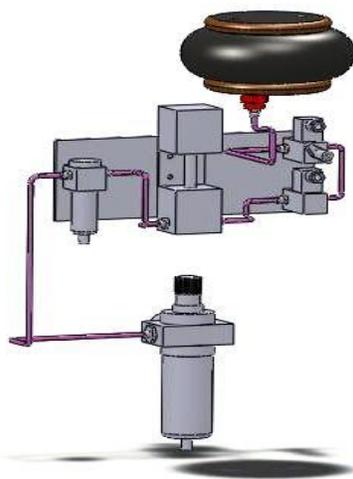


Fig. 81 Conexión neumática

Este subsistema realiza las actividades enumeradas en el GRAFCET de macroetapas mostrado en la Fig. 66 como: 6, 8, 10, 13, 14 y 16.

Este proceso, está soportado por el sistema de control (el cual será analizado posteriormente), el proceso de control, se basa en un sensor de carga, el cual nos muestra la carga en un momento de terminado y así activar la función necesaria para obtener la carga de prueba.

La principal necesidad del sistema, es la precisión de aplicación y variabilidad de la carga que se aplicara para las diferentes pruebas que se desarrollen, así como la habilidad de mantener la carga de la prueba durante el tiempo de duración de la misma.

4.2.2 Sistema de Transferencia de Energía: Térmico

Del estudio de la termodinámica se puede apreciar que la energía se puede transferir mediante la interacción de un sistema con sus alrededores. Esta interacción se denomina trabajo y calor.

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Se definen diferentes tipos de transferencia de calor como son(50):

- Conducción: Transferencia de calor producida a través del medio, cuando existe una gradiente de temperatura en un medio estacionario (ya sea sólido a líquido).
- Convección: Se refiere a la transferencia de calor corrida entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas.
- Radiación térmica: Todas las superficies con temperatura finita, emiten energía con en forma de ondas electromagnéticas. Por lo tanto en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación de dos superficies a diferentes temperaturas.

Este sistema se emplea para elevar la temperatura del contenedor de probetas a la temperatura especificada por la prueba a realizar.

Este sistema cumple con un ciclo, el cual representa, la función de transferencia térmica del sistema definida por el ciclo representado en la Fig. 82 y en la Fig. 83.

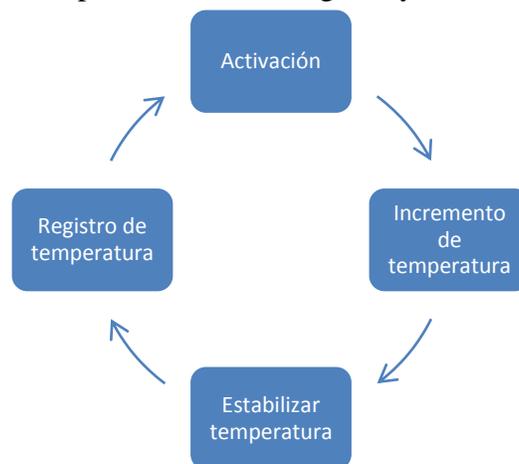


Fig. 82 Ciclo del sistema termoelectrico

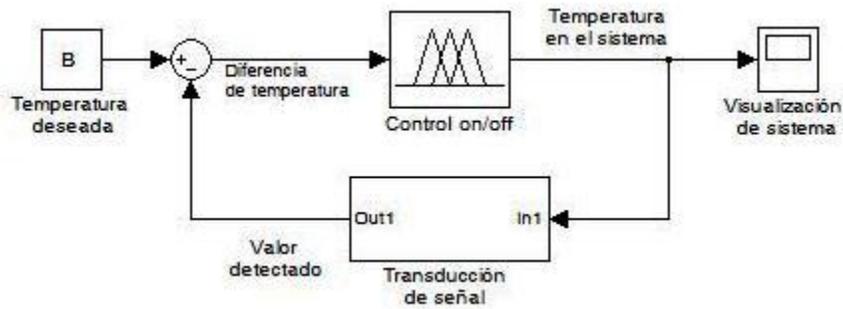


Fig. 83 Ciclo de control del subsistema térmico

4.2.2.1 Subsistema termoelectrico

La temperatura en la prueba, es una de las principales variables que simulan el trabajo de los lubricantes. En esta ocasión el sistema térmico se concentra en la elevación de la temperatura hasta el valor marcado por las diferentes normas.

- Resistencia

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser directo, cuando la corriente eléctrica pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan por radiación, conexión o una combinación de ambas, proveniente de las resistencias previamente dichas, dispuestas en contacto o proximidad de las mismas, el elemento resistivo utilizado se muestra en la Fig. 84, la cual cuenta con las características enlistadas en la Tabla 25.



Fig. 84 Resistencia

Tabla 25 Descripción del elemento resistivo

Número	Nombre	Descripción
1	Base soldada	Base soldada, a una presión de 60 kg/cm ²
2	Funda metálica	Acero inoxidable AISI 304/316/321/Incoloy
3	Disco cerámico	Disco cerámico de aislamiento.
4	Oxido de magnesio	Oxido de magnesio puro de granulometría controlada.
5	Hilo calefactor	Hilo calefactor Nickel-Cromo 80/20 punto de fusión 1400 °C.
6	Núcleo cerámico	Núcleo cerámico.
7	Cabezal cerámico	Cabezal cerámico duro.
8	Hilo conductor	Cable conductor.
9	Pasta refractaria	Pasta dura refractaria

Las resistencias se comportan como una carga eléctrica completamente resistiva. La relación entre tensión V, la intensidad I, la potencia P, y la resistencia eléctrica a temperatura R_t se deduce la ley de ohm, que permite determinar fácilmente todas las relaciones existentes entre dichas magnitudes (51).

○ Relevadores

Aun cuando tanto los relevadores electromecánicos, como los relevadores de estado sólido están diseñados para proporcionar una función de switcheo común, cada uno llega a los resultados finales a través de distintas formas.

Básicamente, los relevadores electromecánicos proporcionan la función de conmutar por medio del uso de dispositivos electromecánicos y grupos de contactos, en tanto que los relevadores de estado sólido dependen de dispositivos electrónicos, tales como los rectificadores de silicio controlado (SCR), Triacs para efectuar la función de switcheo sin contactos, etcétera, ejemplo de ellos los observamos en la Fig. 85 y el seleccionado para el proyecto en la Fig. 86 (52)

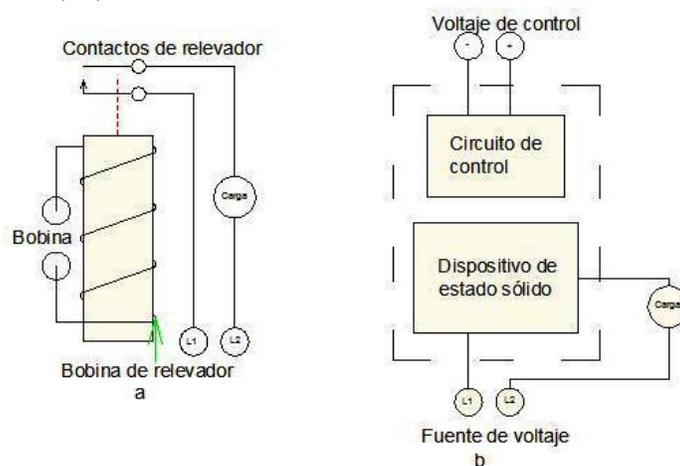


Fig. 85 a) Relevador electromecánico, b) Relevador de estado sólido



Fig. 86 Relevador

4.2.2.2 Diagrama de conexiones del subsistema térmico

El diagrama muestra las conexiones así como los elementos requeridos para realizar la función, tanto de alimentación como de actuación del sistema térmico caracterizado por el circuito mostrado en la Fig. 87, en listando los elementos en la Tabla 26 y modelado en como en la Fig. 88 :

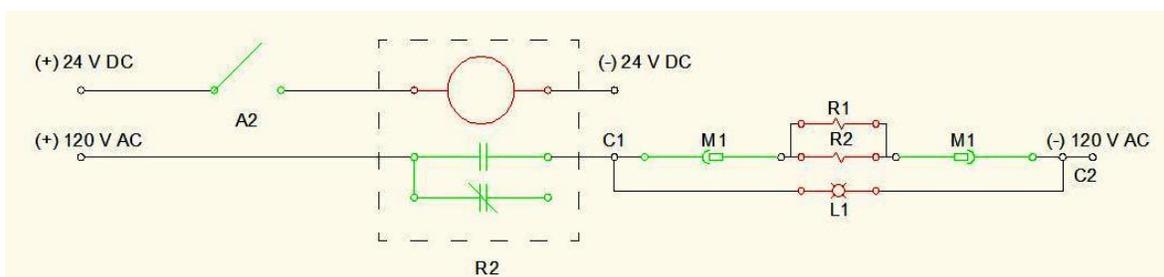


Fig. 87 Diagrama eléctrico

Tabla 26 Elementos integrantes del sistema eléctrico

Símbolo	Material
A2	Puerto de la tarjeta de salidas analógicas NI-9472
R2	Relevador de control
C1,C2	Clemas de conexión
M1	Conector de resistencias
R1,R2	Resistencias térmicas
L1	Let indicador de trabajo

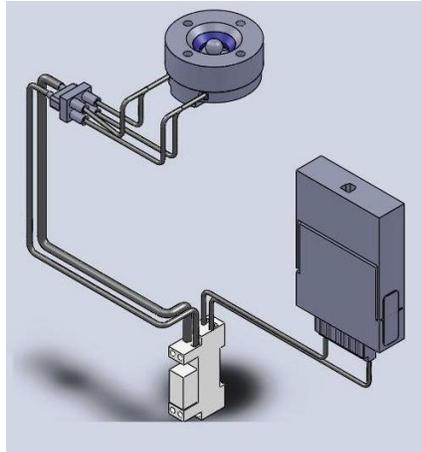


Fig. 88 Cableado del sistema eléctrico

Este subsistema realiza las actividades enumeradas en el GRAFCET de macroetapas mostrado en la Fig. 66 como: 9 y 11.

4.2.3 Sistema de Transferencia de Energía: Giro

En las superficies de contacto de dos cuerpos, comprimidos por una carga, se produce una deformación elástica en ellos, Hertz estudió estos contactos elásticos en cojinetes y engranes, analizando los diferentes tipos uniones, concretamente en el caso de cuerpos esféricos en los que las zonas de contacto son muy pequeños con relación a su radio.

La carga aplicada originará una presión que se distribuye en la zona de contacto denominada zona hertziana, con el valor máximo de presión en el centro de las mismas y nula en los extremos de contacto(53).

Siendo este un sistema de transferencia, podemos definir un proceso de entrada-salida, representado por la Fig. 89:

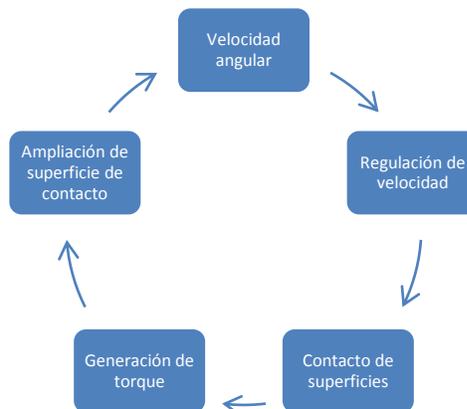


Fig. 89 Ciclo de sistema de giro

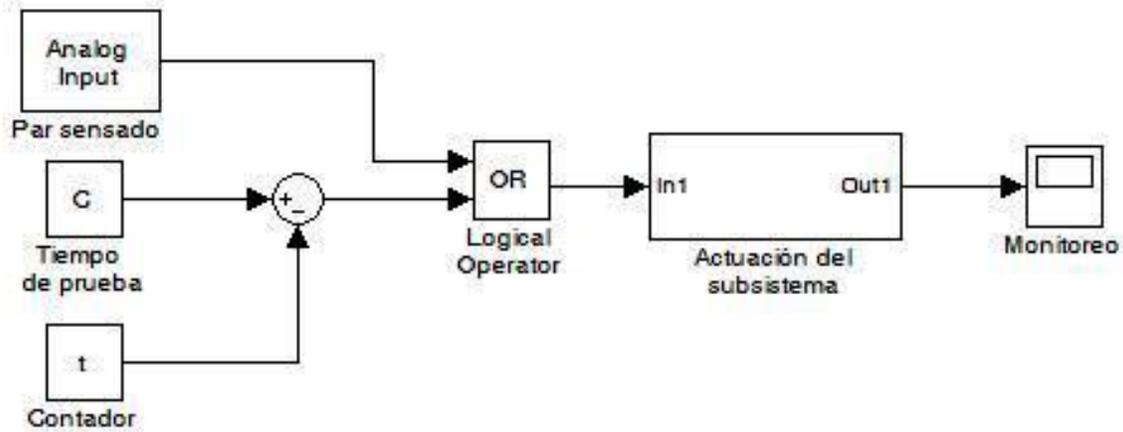


Fig. 90 Ciclo de operación del sistema de giro

4.2.3.1 Subsistema de Giro

Generación de movimiento

Un motor eléctrico es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromecánicas. En el proyecto, la generación y transmisión de movimiento giratorio, es uno de los principales sistemas, ya que este genera y controla una de las principales variables que intervienen en las diferentes pruebas. Para la selección del motor se consideraron las características mostradas en la Tabla 27.

Tabla 27 Parámetros para la selección del motor

Parámetro	Valor	Observaciones
Coefficiente de fricción estático	$\mu = 0.15$	Valor definido por el contacto acero-acero
Carga máxima a aplicar	800 kgf	Es la carga más elevada requerida por los ensayos normalizados
Fuerza de fricción generada	120 kgf	Es la fuerza de fricción estática presente en el arreglo bajo la carga máxima
Par máximo a superar	0.4399 kgf-m	Este par se presenta a 3.666 mm de distancia entre el eje motriz del sistema y los puntos de contacto
Velocidad máxima requerida	1700 RPM	Valor máximo marcado por las normas

Para esto, se definieron los siguientes elementos mostrados en la Tabla 28, así como el modelado en la Fig. 91 y describiendo sus elementos en la Tabla 29, el cual muestra un motor que cumple con las características de prueba en un 100%:

Tabla 28 Elementos eléctricos del sistema de par

Motor

Motor



Característica

Marca: Siemens

2 Hp

1800 RPM

Par nominal= 0.84 kgf-m

220/440 Trifásico

Tipo: Jaula de ardilla

Arrancador



15 Amp

Bobina a 120 V AC

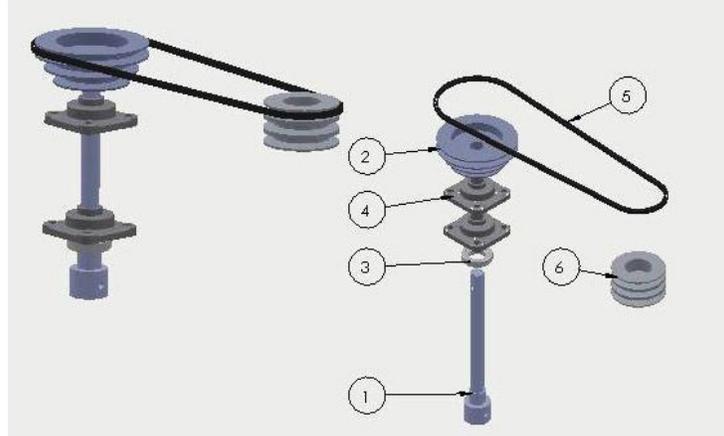


Fig. 91 Transmisión de giro

Tabla 29 Elementos del sistema de transmisión

Número	Pieza
1	Flecha motriz
2	Polea de conducción
3	Rodamiento de carga axial
4	Chumacera
5	Banda transmisora
6	Polea motriz

4.2.3.2 Diagrama de conexiones del motor

El diagrama de conexiones que se muestra en la Fig. 92 y descrito en la Tabla 30, el cual genera un modelado de la Fig. 93.

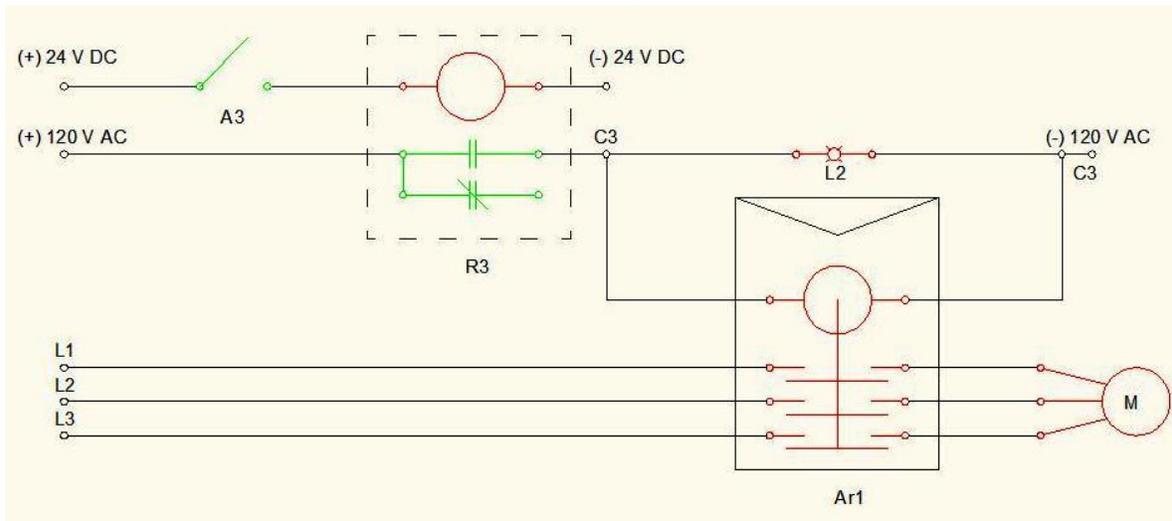


Fig. 92 Diagrama de conexiones del motor

Tabla 30 Elementos del motor

Símbolo	Descripción
A3	Puerto de la tarjeta de salidas analógicas NI-9472
R3	Relevador de control
L2	Let indicador de trabajo
Ar1	Arrancador trifásico
C3	Clema de conexión
L1,L2,L3	Líneas de alimentación
M	Motor

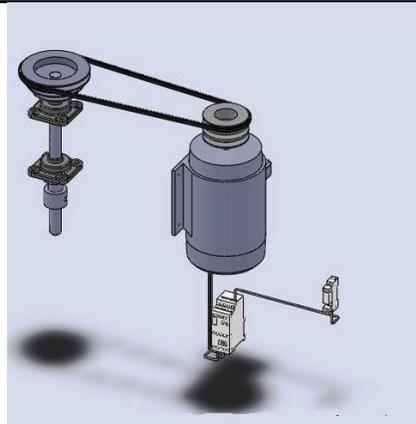


Fig. 93 Conexión del sistema de generación y transmisión de giro

Este subsistema realiza las actividades enumeradas en el GRAFCET de macroetapas mostrado en la Fig. 66 como: 11 y 12.

CAPÍTULO 5. MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA.

Cada uno de los sistemas que comprenden un mecanismo complejo, el cual se desea automatizar, es necesario conocer el comportamiento de cada uno de los elementos. Esto resulta costoso si se realiza de forma física y se realizan pruebas de error-corrección. Para ello se desarrollan los modelos matemáticos, estos simulan el proceso del sistema, esta operación nos arroja las características de comportamiento, resaltando los puntos más susceptibles a falla.

Al conocer el comportamiento del sistema, se procede a la construcción del mismo, teniendo presente los puntos débiles del sistema. La construcción de la máquina de ensayos tribológicos, convino diferentes aspectos, desde la construcción de la estructura, hasta la programación del sistema y la interfaz hombre máquina (H-M).

Este capítulo concluye con la *fase de diseño*, el cual especifica el GRAFCET, ya que la implementación de las bases del sistema generadas en el capítulo anterior se complementa para finalizar con la fase central del GRAFCET.

5.1 Modelado matemático de los sistemas

5.1.1 Definición matemática del sistema neumático

El objetivo de la simulación matemática es la de, es calcular teóricamente las necesidades del sistema, así como identificar las variables necesarias, para cumplir con el objetivo.

Para desarrollar este análisis se tomaron en consideración la siguiente idealización del sistema:

Considerando al aire como un gas ideal

- La densidad del gas es uniforme en la cámara del actuador, tubería y juego de válvulas.
- La aplicación de carga, en específico, la actividad desarrollada por el actuador neumático se considera isotérmica.
- El flujo a través de las válvulas de control se considera isotrópico.
- Despreciando las fuerzas de fricción presentes en el flujo de aire.

Regulación de presión

- Características de válvula reguladora:
 - Motor 24 v DC (reversible)
 - Reductor a 6 RPM
 - Caudal de 0 -100 % en 5.5 (Revoluciones de la flecha de apertura)

Calculo de regulación de presión.

Para definir la función que simule el comportamiento del sub subsistema neumático, se utilizaron las siguientes formulas:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{Función de velocidad angular.} \quad 71$$

$$P_s = Pk \quad \text{Ecuación de presión de salida, definida por el mecanismo de la válvula reguladora.} \quad 72$$

$$k = Ax \quad \text{Constante de proporción de alimentación de presión.} \quad 73$$

$$A = \frac{(5.5)p_a}{100} \quad \text{Constante porcentual de apertura en función del número de vueltas.} \quad 74$$

$$x = p_a \int_0^{55} \omega dt \quad \text{Desplazamiento lineal en función del número de vueltas (radianes) y el paso del tornillo regulador de presión.} \quad 75$$

De las ecuaciones mostradas, se obtiene que la función de regulación de la válvula como:

$$P_s = P A p_a \int_0^{55} \omega dt \quad 76$$

Donde:

ω	Velocidad angular dada en rad/s = 0.1 rad/s
θ	Desplazamiento angular en rad. (2π rad= 1 revolución)
P	Presión de entrada en kgf(constante)
p_a	Paso del tornillo de apertura.
P_s	Presión deseada

Trabajo del actuador neumático

El comportamiento del actuador neumático se define tanto por las características que definen el actuador, como las necesidades de entrada como de salida del actuador.

Definición del sistema de actuación, Fig. 94, Fig. 95:

Calculo de la presión

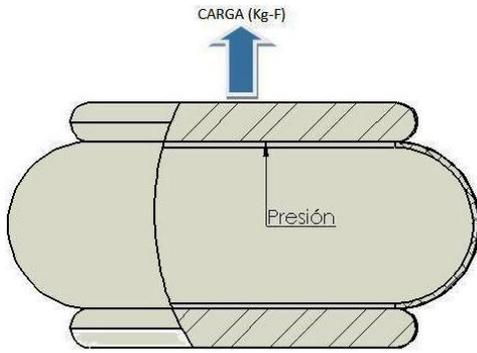


Fig. 94 Fuelle neumático

$$P_e = \frac{F}{A}$$

77

F	Fuerza
A	Área de actuación
P_e	Presión requerida
$A = \pi r^2$	Área de trabajo

78

La carga que se aplica en el sistema se divide en dos componentes, como se presenta en la ecuación 79:

- Carga activa (L en kg-f): Es la carga que se especifica para el desarrollo de la prueba.
- Carga pasiva (Mm en kg-f): Es la carga que se suministra para contrarrestar el peso efectivo del sistema de transferencia de carga así como del contenedor. Esta carga se muestra en la Fig. 95 así como los elementos que la integran.

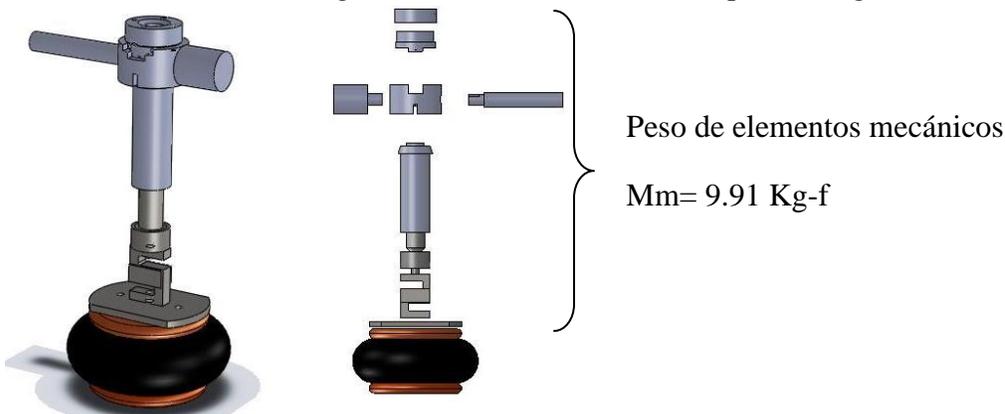


Fig. 95 Elementos del sistema de carga

Considerando el peso de los componentes mecánicos, la fórmula anterior se define como:

$$F = Mm + L$$

79

$$A = 408.61 \text{ cm}^2 \quad \text{Área de trabajo}$$

Para describir el comportamiento del cilindro neumático, se utiliza la ecuación de estado de los gases, ecuación de energía y la de movimiento, para lo cual resulta la siguiente ecuación (54):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{P \cdot V}{T} \frac{dT}{dt} + R \cdot T \cdot G - P \cdot \frac{dV_d}{dt} \right)$$

80

donde:

P	Presión (kPa)
V	Volumen (m ³)
T	Temperatura (K)
G	Velocidad de flujo
R	Constante universal de los gases (j/kgK)
V _d	Volumen limite (m ³)

Siendo esta, una ecuación de primer orden, de la forma:

$$a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_0 y \quad x; \text{ Salida, } y; \text{ Entrada}$$

81

$$x = \frac{b_0}{a_0} y \left(1 - e^{-\frac{a_0}{a_1} t} \right)$$

82

Considerando una temperatura constante en la cámara se obtiene el tiempo en el que prácticamente se alcanza el estado estable de la presión en el actuador:

$$t = 3 \frac{RG}{PV}$$

83

donde:

$$R = 286.9 \text{ (j/kgK)}$$

P= Presión definida por la prueba

$$V = 6800.632 \text{ cm}^3$$

Flujo neumático

Partiendo desde la ecuación de continuidad:

$$m = \rho \cdot A \cdot \partial z \quad \text{Masa del aire}$$

$$\dot{m} = \rho_t A_t v_t \quad \text{Flujo másico}$$

$$A_t \quad \text{Área transversal}$$

$$\rho_t \quad \text{Densidad del gas}$$

$$v_t \quad \text{Velocidad del gas}$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \dot{m}_{i-1} - \dot{m}_i$$

84

Comenzado por la ecuación de los gases, y asumiendo que el volumen es constante tenemos que:

$$\frac{dP_t}{dt} = \frac{R \cdot \theta_i}{V} (\dot{m}_{i-1} - \dot{m}_i) + \frac{R \cdot m_i}{V} \frac{d\theta_i}{dt}$$

85

La ecuación de movimiento del aire se derivada de la segunda ley de Newton, y se describe como:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{P_i - P_{i+q}}{\rho_i \cdot \delta z} - \frac{\lambda}{2d} \cdot w_i \cdot |w_i| - |w_i| \cdot \frac{\partial w_i}{\partial z}$$

86

Donde λ es el coeficiente de fricción de la tubería y es un factor del número de Reynolds como:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad Re < 2.5 \times 10^3$$

$$\lambda = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad Re < 2.5 \times 10^3$$

5.1.1.1 Modelo matemático del Sistema de Transferencia de Energía: neumático

Observando el comportamiento del sistema, este se puede dividir en tres elementos básicos, Fig. 96:



Fig. 96 Proceso de STE: neumático

Consideraciones del sistema:

El incremento de presión conforme a la regulación es relativamente rápido con respecto al proceso de apertura de la válvula reguladora por lo que es posible considerar que la relación entre P_0 y P_1 esta marca por la ecuación 87

$$P_1 = P_0 \cdot k$$

87

donde:

P_1 Presión necesaria para la carga.

k Constante de regulación.

Despreciando la fuerza de fricción presente en la tubería, tenemos que la velocidad de flujo del sistema está dada por la ecuación 88

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{P_i - P_{i+q}}{\rho_i \cdot \delta z}$$

ρ_i	Densidad de aire
δz	Sección transversal del conducto
∂t	Tiempo de variación de velocidad
$P_i - P_{i+q}$	Variación de presión del sistema
∂w	Velocidad de flujo

El comportamiento del actuador neumático desarrolla la carga de aplicación del sistema, así como la estabilidad requerida para realizar la prueba, para esto se define este comportamiento como:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{P \cdot V}{\theta} \frac{d\theta}{dt} + R \cdot \theta \cdot G - P \cdot \frac{dV_d}{dt} \right)$$

89

Con un tiempo de equilibrio definido por:

$$t = 3 \frac{RG}{PV}$$

90

R	Constante universal de los gases.
P	Presión de la prueba.
V	Volumen de actuación.
G	Gasto del sistema.
θ	Temperatura.

Donde G está en función de la velocidad de flujo calculada en la tubería

5.1.2 Definición matemática del sistema térmico

Conforme a las características de los elementos resistivos utilizados se tiene que:

$$P = v \cdot i = i^2 \cdot R \quad \text{Potencia eléctrica, en Watts}$$

91

$$Q = i^2 \cdot R \cdot t \quad \text{Calor suministrado por las resistencias en un tiempo "t", en Jules}$$

92

Obteniendo:

$$Q = P \cdot t$$

93

Transferencia de calor

Consideraciones

- Transmisión de calor por medio de conducción térmica

$$q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

94

donde

q	Flujo de calor
ρ	Densidad del elemento
C_p	Capacidad calorífica a presión constante
T	Temperatura
t	Tiempo

Considerando la ley de Fourier, como la transferencia de calor unidireccional, se obtiene que el flujo térmico sea:

$$\dot{q} = -\lambda A \frac{dT}{dz}$$

95

donde:

\dot{q}	Flujo térmico
λ	Conductividad térmica
A	Área de contacto
dz	Distancia del sistema (longitud entre la fuente calorífica y el punto de medición)

5.1.2.1 Modelo matemático del Sistema de Transferencia de Energía: Térmico

Consideraciones, la Fig. 97 se muestra la evolución de la aplicación de temperatura:

- La energía calorífica producida por las resistencias, se mantiene constante.
- La transferencia térmica de las resistencias hacia el POT, se realiza de forma constante.
- La superficie en contacto con el lubricante cambia su temperatura de forma constante y uniforme.
- Las probetas de prueba, por tener solo contacto puntual, la transmisión de energía calorífica es cero.

126

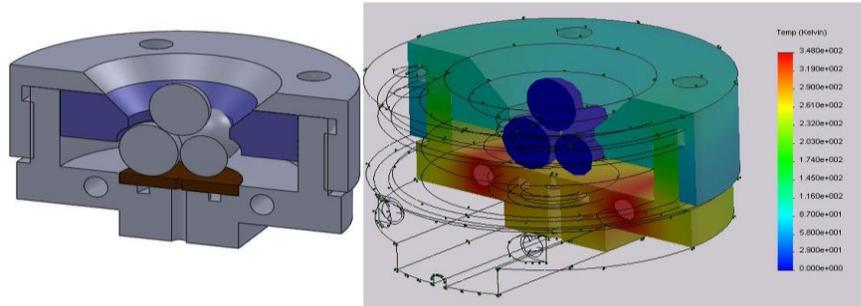


Fig. 97 Definición del sistema térmico del contenedor de probetas

El funcionamiento del subsistema térmico se muestra en la Fig. 98:

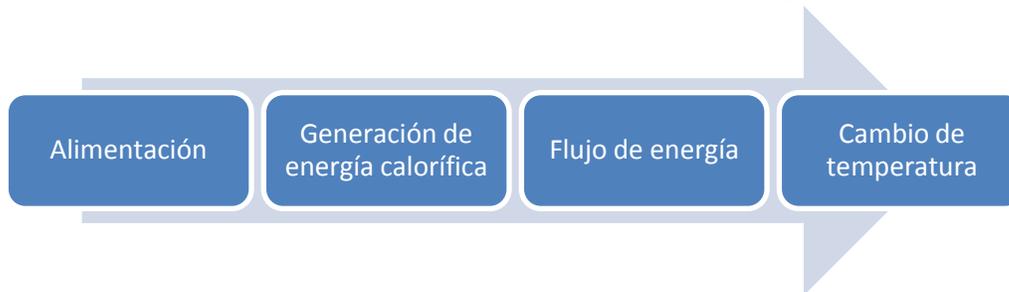
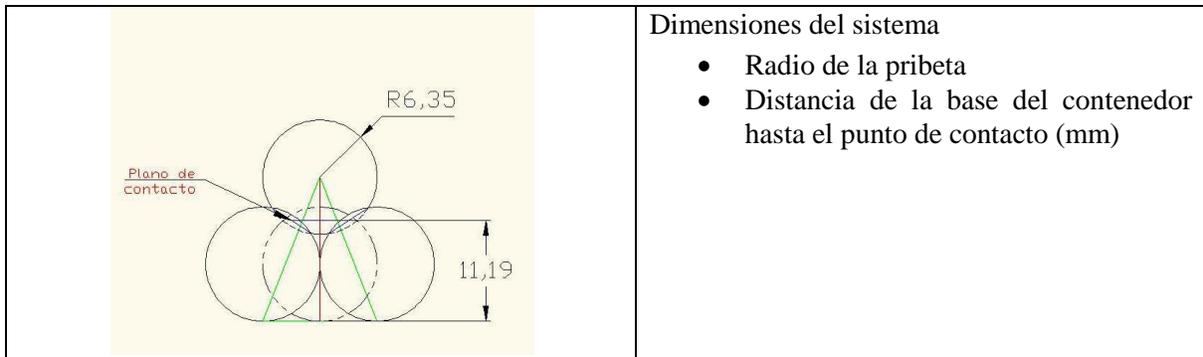


Fig. 98 Proceso de STE: Térmico

La descripción de matemática del sistema, se muestra el comportamiento de la transferencia de calos, la cual se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31 Cálculos de transferencia de calor

	<p>Elementos involucrados en el sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resistencias eléctricas. • POT- Recipiente de prueba. • Material lubricante. • Probetas de prueba.
	<p>Transferencia térmica TR- Temperatura de la resistencia T1- Temperatura de la superficie T2- Temperatura en el punto de contacto (Temperatura de prueba)</p>



Flujo de temperatura T1-T2: (Temperatura de prueba en el plano de contacto)

$$\dot{q}_l = -\lambda_l A_l \left(\frac{T_2 - T_1}{l_2} \right)$$

96

donde:

- λ_l Coeficiente térmico del lubricante $\frac{W}{m^{\circ}C}$.
- A_l Área de contacto del POT con el lubricante m^2 .
- l_2 Altura del lubricante m , (11.19 mm).
- T_1 Temperatura de la superficie de contacto del POT $^{\circ}C$.
- T_2 Temperatura del plano de contacto (Temperatura de la prueba).

Flujo de temperatura TR-T1 (Temperatura de prueba en la superficie del POT)

$$\dot{q}_p = -\lambda_p A_p \left(\frac{T_1 - T_R}{l_R} \right)$$

97

donde:

- λ_p Coeficiente térmico del acero $\frac{W}{m^{\circ}C}$.
- A_p Área de contacto de las resistencias m^2 .
- l_R Altura de la base m , (11.19 mm).
- T_R Temperatura en el área de contacto de las resistencias $^{\circ}C$.

Flujo de temperatura total

$$\dot{q}_t = \dot{q}_l + \dot{q}_p$$

98

- \dot{q}_t Flujo total
- \dot{q}_l Flujo en el lubricante
- \dot{q}_p Flujo en el POT

128

Conducción calorífica

$$q_t = \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{T_{R1} - T_{R0}}{t} \right)$$

99

T_{R1} Temperatura de la superficie de contacto entre las resistencias y el POT en un tiempo $t=i$.

T_{R0} Temperatura de la superficie de contacto entre las resistencias y el POT en un tiempo $t=0$.

ρ Densidad del material.

C_p Capacidad calorífica.

t Tiempo de aplicación.

Calculo de potencia calórica de las resistencias:

$$P = i^2 \cdot R = 60 \text{ w}$$

100

$$Q = P \cdot t = 60 \cdot t \text{ j}$$

101

5.1.3 Definición matemática del sistema de par

Definición de poleas:

$$D_c = \frac{N_m \cdot D_m}{N_c}$$

102

D_c Diámetro de la polea de conducción.

N_c Velocidad de conducción.

N_m Velocidad motriz (Velocidad constante del motor).

D_m Diámetro de la polea motriz.

El sistema tetraédrico mostrado en la Fig. 99, representa el acomodo geométrico de las probetas en el contenedor, en el cual se muestra la resultante de la carga aplicada en función del ángulo de contacto en el arreglo.

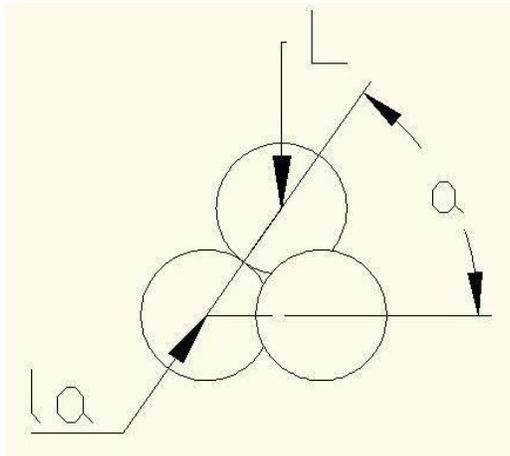


Fig. 99 Ángulo de trabajo

La carga se distribuye en tres puntos, lo cual se describe como:

$$\frac{L}{3} = L \cdot \text{sen}(a)$$

103

la Reacción en un punto de contacto.

L Carga de trabajo.

a Ángulo de reacción.

El par generado por la carga se representa por la Fig. 100:

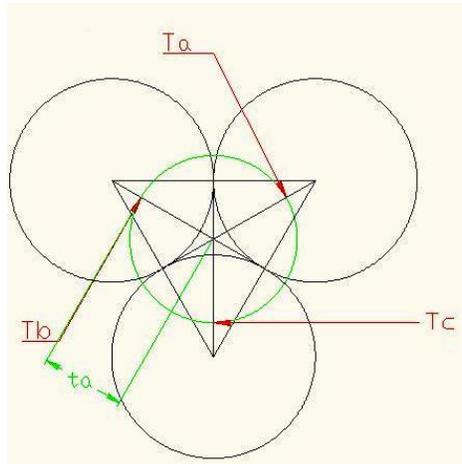


Fig. 100 Par del sistema

$$T = T_a + T_b + T_c$$

104

$$T_a = f \cdot t_a$$

105

donde:

$$f = \mu_e \cdot L$$

106

130

μ_e	Coefficiente de fricción estática del acero
L	Carga aplicada
T	Par del sistema
f	Fuerza de fricción
t_a, t_b, t_c	Componentes del par en los puntos de contacto

5.2 Sistema de control

Los sistemas de control, se definen con el objetivo de desarrollar una simulación y poder observar el comportamiento de los diversos sistemas. Estos están directamente relacionados al comportamiento de las variables fundamentales con las cuales la prueba se desarrollara.

Estas son:

- Carga.
- Temperatura
- Par
- Velocidad

Al conocer y/o controlar las variaciones de estos parámetros, es posible predecir el comportamiento de la prueba, conociendo su proceder y por lo tanto, definiendo los valores significativos presentes en el proceso.

5.2.1 Sub-sistema neumático

Como observamos en el capítulo anterior el STE neumático se divide en tres partes fundamentales que son:

- Regulación de presión, el comportamiento mostrado en la Fig. 102, representa el funcionamiento de la válvula reguladora conforma a su modelo matemático.

$$P_s = P A p_a \int_{t=0}^{t=i} \omega dt$$

Ecuación de regulación de presión. 76

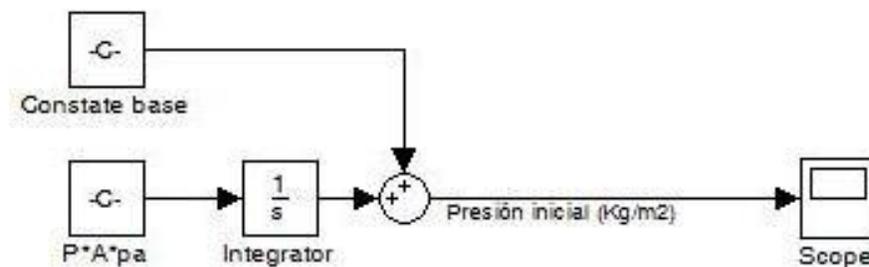


Fig. 101 Diagrama de comportamiento de válvula reguladora

El diagrama de control modela el comportamiento de la válvula reguladora, la cual está controlada por una señal booleana de encendido/apagado. Esta tiene un comportamiento líela que se muestra en la Fig. 102

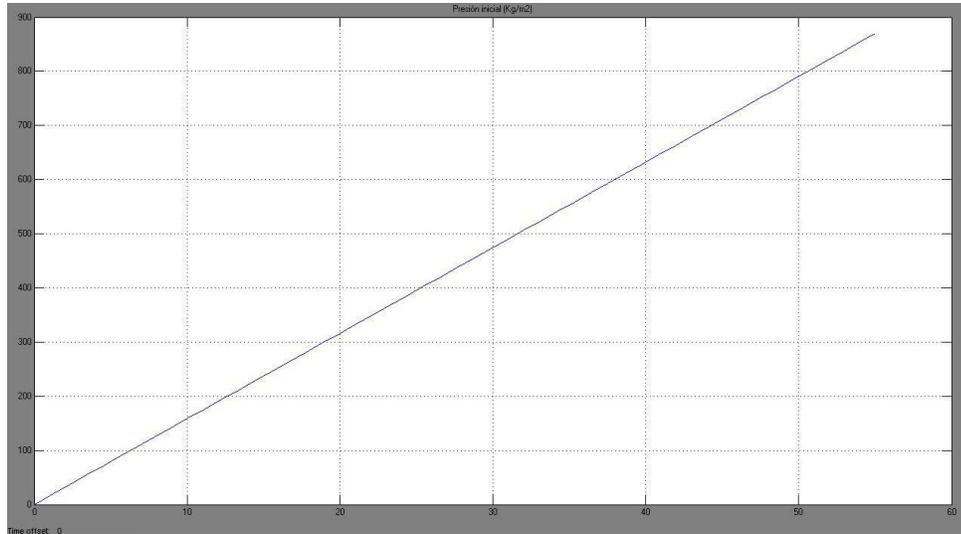


Fig. 102 Representación del comportamiento de la Válvula reguladora (Kg/m²)

- Flujo de aire (Por la longitud del sistema, se considera que en este no hay fuerza de fricción en la tubería)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{P_i - P_{i+q}}{\rho_i \cdot \delta z}$$

107

- El comportamiento del actuador neumático, mostrado en la Fig. 103, representa su funcionamiento con respecto al tiempo y a parámetros predeterminados, modelados de forma matemática.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{P \cdot V}{T} \frac{dT}{dt} + R \cdot T \cdot G - P \cdot \frac{dV_d}{dt} \right)$$

Ecuación del comportamiento del actuador.

108

$$T = \frac{V}{RG} P \left(1 - e^{-\frac{a1}{a0}t} \right)$$

Ecuación de comportamiento de la temperatura en el actuador.

109

$$P = \frac{RT}{V}$$

Ecuación general de los gases.

110

$$C = PA$$

Ecuación de presión.

111

$$\tau = 3 \frac{RG}{PV}$$

Tiempo de equilibrio del sistema.

112

132

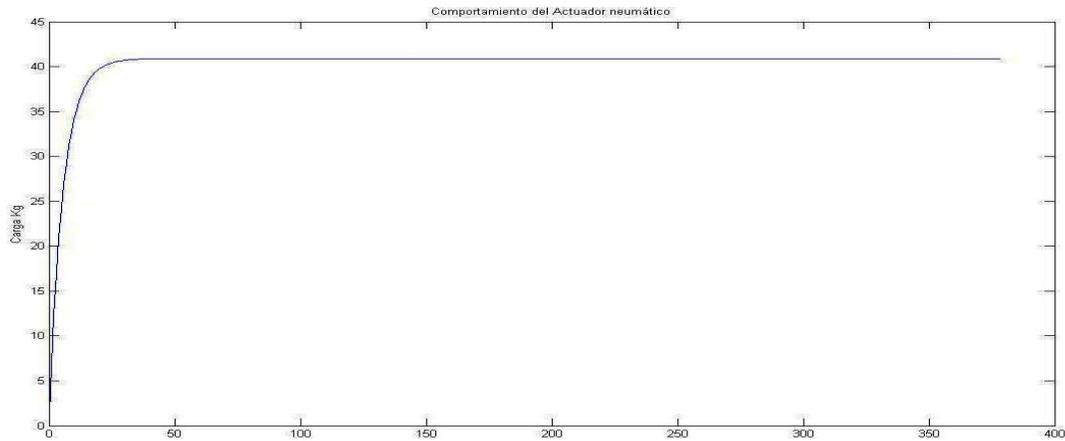


Fig. 103 Comportamiento del Actuador neumático

El sub-sistema de control neumático, regula y controla las actividades relacionadas principalmente con la aplicación y liberación de carga, en las diferentes operaciones en donde es requerido por el sistema.

Este sub-sistema controla el parámetro de la carga en un amplio margen, que va desde los 5 Kg hasta los 800 Kg. Esto es con el objetivo de dar al usuario la libertad de manipular la carga según sean sus necesidades y no limitarlo a los parámetros definidos por las normas.

Este sub-sistema desarrolla las actividades de:

- Control de la válvula reguladora.
- Flujo de aire hacia el actuador neumático.
- Regulación de presión en el sistema.
- Desfogue de aire

Estas actividades están involucradas en las operaciones de:

- Carga para cierre y apertura de contenedor de contenedor.
- Aplicación de carga de prueba.
- Regulación de carga aplicada.

Este sub-sistema

5.2.2 Sub-Sistema térmico

El sub-sistema está encargado de mantener el material lubricante a una temperatura adecuada, la cual es determinada por la prueba a realizar.

El objetivo principal del control térmico, es el mantener a una temperatura de prueba con una tolerancia de $\pm 2^\circ \text{C}$. Para esto, se definió un control de límite, el cual se determina por un valor superior (Temperatura de la prueba) y un valor inferior (1° por debajo de la temperatura de la prueba).

El ensayo se realizado, muestra el comportamiento del subsistema térmico, el cual mantiene en un rango de $\pm 2^\circ \text{C}$ la temperatura de la prueba, con una tendencia al equilibrio como se muestra en la Fig. 104:

- Nombre del material lubricante: SF-SAE-40
- Temperatura: 60,000000 °C
- Tiempo: 28800,000000 Seg

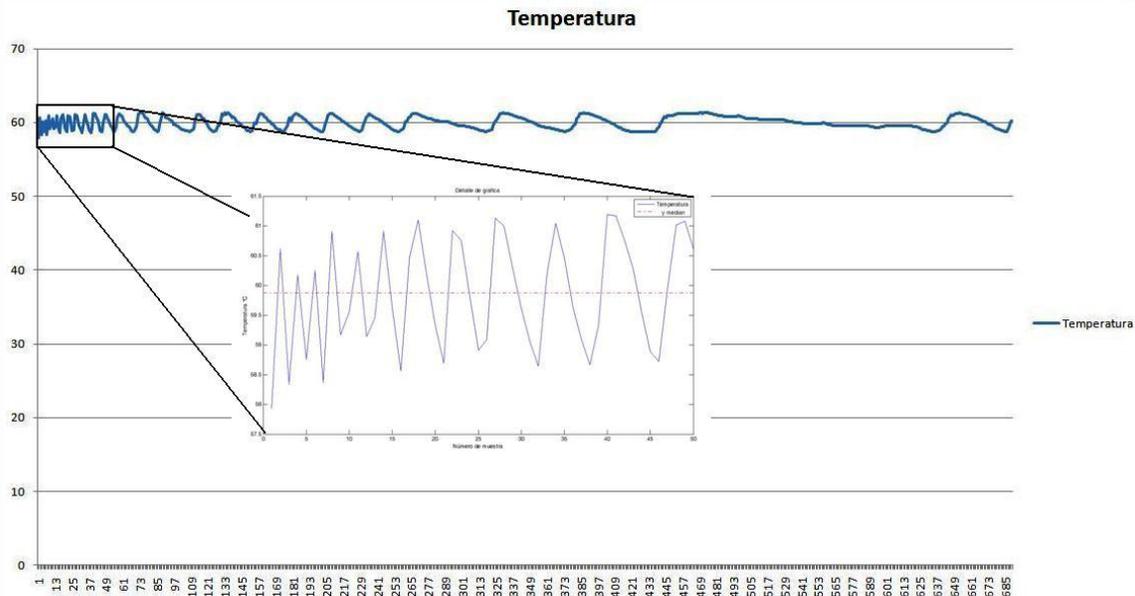


Fig. 104 Gráfica del comportamiento del sub-sistema térmico

La grafica mostrada en la Fig. 104, muestra el comportamiento del subsistema térmico en condiciones practicas, esto demuestra el control que se establece en los ensayos tribológicos.

El sistema aplica las siguientes actividades al sistema:

- On/Off del relevador que permite la alimentación de las resistencias con forme a valores límites.

Esta actividad de fine el inicio o paro de las siguientes operaciones:

- Calentamiento del sistema hasta una temperatura definida.

5.2.3 Sub-sistema de par

Este sub-sistema, está encargado de activar y desactivar elementos que controlen tanto las condiciones iniciales de la prueba, como el desarrollo de la misma (este sub-sistema está basado en la variable “Par”), la cual es generada tanto manualmente en algunas de las operaciones de la máquina, como por el fenómeno tribológico durante el ensayo, como se ejemplifica en la Fig. 105.

Por esta razón, el control determinado para esta variable centrado en valores límites, estos valores, son:

- Par especificado por normas, el cual es aplicado para evitar el movimiento de las tres probetas que sirven como base del arreglo tetraédrico (de 33.8 a 67.8 N-m).
- Par máximo permisible generado durante la prueba; este representa el par generado por la fuerza de fricción entre las probetas. El límite máximo se produce cuando el arreglo tetraédrico se suelda por efectos de la fricción. Este valor es muy

importante, no solo para obtener la soldadura de las probetas, sino principalmente para garantizar la integridad del mecanismo como la del usuario. Este valor es un 20% menor al torque generado por el sistema de giro (particularmente por el motos), que es: 3.45 N-m.

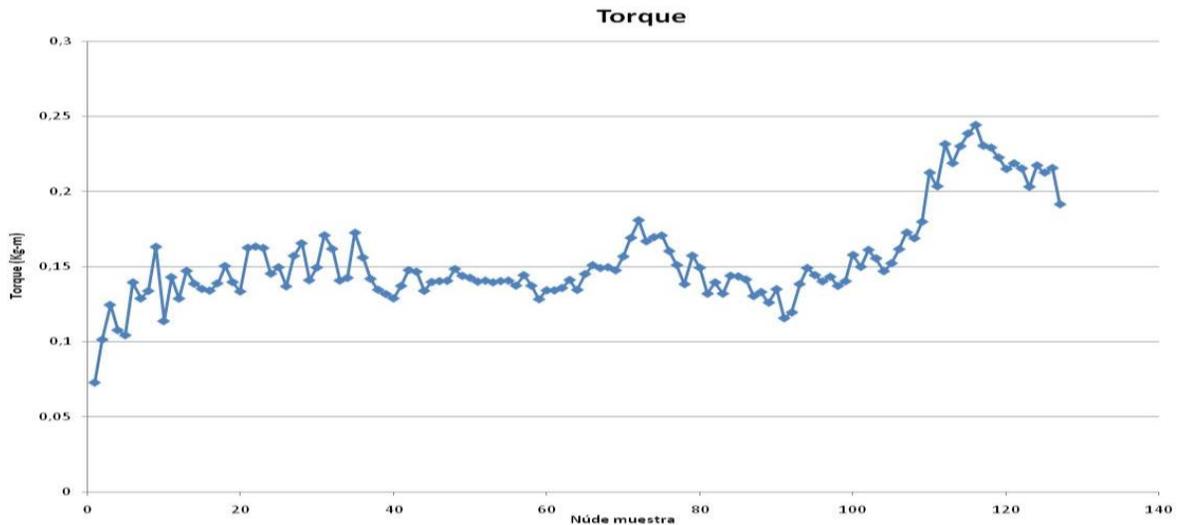


Fig. 105 Gráfica de par generado durante la prueba, bajo condiciones definidas.

Las actividades que desarrolla el sub-sistema de control de par son:

- Cerrado de contenedor a par específico.
- Paro de sistema, cuando el par generado supera el límite recomendado.

Estas actividades domina las operaciones de:

- Paro de prueba por límite de par superado.
- Cierre del contenedor
- Apertura del contenedor

5.2.4 Sub-sistema de control de velocidad

Este sub-sistema se limita a una actuación booleana de encendido y apagado ya que no se cuenta con un variador de velocidad. Este sistema está controlado conforme al tiempo definido por la actuación y/o por la superación de límites de otras variables, en particular, la del par.

La velocidad se controla por medio de un sistema mecánico, el cual está definido por una polea motriz y una de regulación. Las velocidades que esta entrega son las básicas para cumplir con las normas internacionales.

5.3 Sistema de monitoreo y registro.

Este sistema se basa tanto en software como en el hardware utilizado para desarrollar el proceso tanto de monitoreo como de registro. Para realizar estas tareas es necesario la implementación y operación de elementos que garanticen principalmente la confianza de los datos obtenidos.

Al igual que en sistema de control, el sistema de registro se concentra en las variables fundamentales del sistema exceptuando las velocidad (Considerada como variable ya registrada). Como ya se menciona en el apartado 4.1.3.3, el sistema de registro como de muestreo cuentan con periodos temporales distintos ya que la optimización del manejo, almacena y definición del ensayo lo requiere.

5.3.1 Elementos de adquisición de datos

La selección de los dispositivos de sensado, dependen tanto de la variable que este registrara así como a las condiciones a las cuales el elemento estará expuesto.

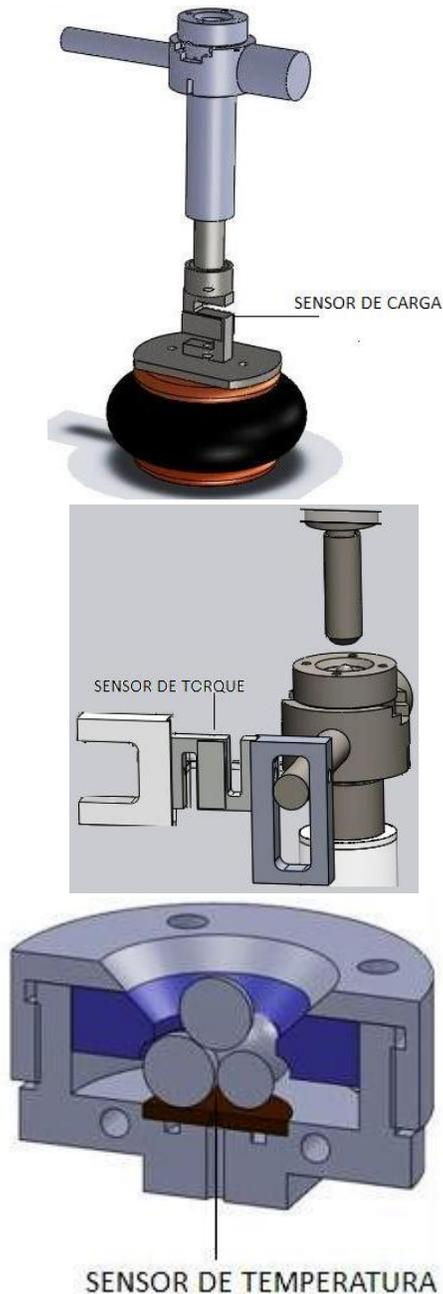
En el sistema se encuentran tres sensores los cuales están encargados del registro de las variables principales del sistema, lo cuales se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32 Elementos de sensado

Elemento	Características
	<i>Carga</i>
	Celda de carga Modelo 60001
	Capacidad: 0-2000 lbs (0- 907.1847 Kg)
	Alimentación: 12 VDC
	Temperatura de trabajo: -18 a 65°C
	Rango de salida: 3 mV/V
	<i>Par</i>
	Celda de carga Modelo 60001
	Capacidad: 0-150 lbs (0- 68.03 Kg)
	Alimentación: 12 VDC
Temperatura de trabajo: -18 a 65°C	
Rango de salida: 3 mV/V	
	<i>Temperatura</i>
	Termopar tipo K
	Aleación: Cromo Níquel
	Rango de temperatura: -200° C a +1.372° C
	Sensibilidad: 41µV/° C aproximadamente

Para obtener el mejor registro de las variables, se opto por colocar los sensores en posiciones estratégicas, lo cual garantizara el registro de cualquier cambio en el sistema. Posición de los elementos de sensado se enlistan en la Tabla 33:

Tabla 33 Posición de elementos de sensado



Consideraciones

Carga

El sensor es colocado como parte del sistema de transmisión, esto garantiza que cualquier cambio en la magnitud de la variable será registrado y por lo tanto conocido.

Esta celda de carga, trabaja a compresión, por lo que fue necesario restarle el peso de los elementos restantes.

Par

Este sensor, está colocado de tal forma que registre los cambios en el par producido en el contenedor, ya sea por actuación manual o generado durante la prueba.

La celda de carga utilizada, trabaja tanto a compresión como a tensión, registándonos tanto valores tanto positivos como negativos (si así los requiriera la prueba)

Temperatura

Como el valor principal de temperatura, es que guarda el material lubricante durante la prueba, se definió su posición dentro del contenedor. Para esto, se evito el contacto entre las superficies tanto de las paredes del contenedor como de la superficie de cualquier probeta.

5.3.2 Registro y monitoreo

Los cambios físicos que sufre el sistema, son sensados por los diferentes elementos, los cuales por medio de una señal ya sea analógica o digital describen dichos cambios, para posteriormente por medio de un dispositivo transductor, poder visualizar y manipular dichos cambios en el sistema.

El proyecto, como ya se observó, utiliza tres elementos de sensado, los cuales perciben los cambios en el sistema, estos traducen las variaciones en una señal analógica, la cual está basada en los cambios que se envían hacia una tarjeta, que se muestra en la Tabla 34, esta traduce esas señales analógicas a señales digitales, las cuales son posteriormente transmitidas en este caso a la PC.

Tabla 34 Características de la tarjeta de adquisición de datos

Características generales	
	4 Canales de entradas analógicas
	24 bits- Resolución ADC
	ADC- Delta-sigma (Con pre filtrado analógico)
	Temperatura de trabajo: -40 a 70 °C

La configuración de la tarjeta se realizó por medio del programa *Signal Express* en el cual se definió el puerto y las características de la señal de entrada, Fig. 106.

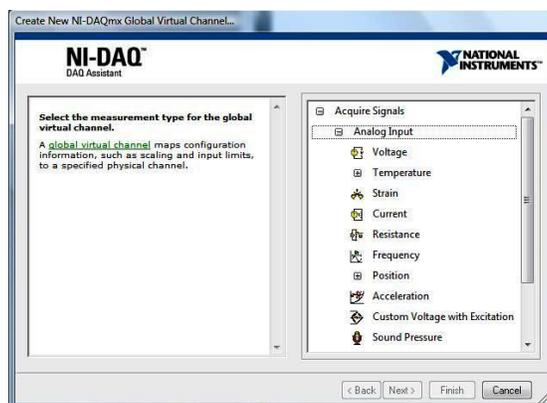


Fig. 106 Configuración de canal y variable

La calibración del sistema, se realiza desde este programa, ya que al definir el canal de cada uno de los sensores, se define también, la variable.

Para calibrar la señal adquirida por el termopar, el sistema cuenta con los parámetros necesarios para realizarla automáticamente, Fig. 107.

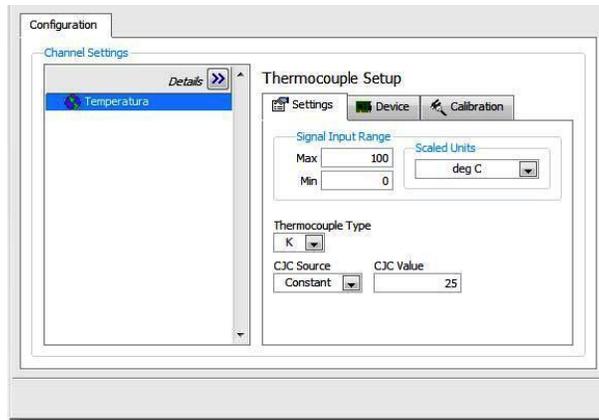


Fig. 107 Calibración Termopar

Sin embargo, para la calibración de los sensores de carga y par fue necesario el ingresar una función de proporcionalidad, la cual está basada en el desarrollo experimental de una calibración con forme a un registro baso (Bascula) y un registro practico (registro de celda de carga y lectura en el programa especializado) como se muestra en la Fig. 109, la Tabla 35 es un ejemplo de los valor registrados prácticamente, resultando en la ecuación 113. La alimentación del sensor, se realizó por medio de la misma tarjeta, la cual entrega un voltaje nominal de 2 V, por lo que le rango de trabajo se desarrolla entre los 0 a 6 mV. Ya que los sensores de carga y par cuando trabajan a compresión los valores que arrojan son negativos como se muestra en la Fig. 108, se multiplicó toda la ecuación 113 por -1 para así desarrollar su calibración. Por lo que la ecuación de calibración de carga se definió como:

$$-262100x - 6.1719 = C$$

113

Donde

- x Registro de carga por el sensor en mV.
- C Carga aplicada.

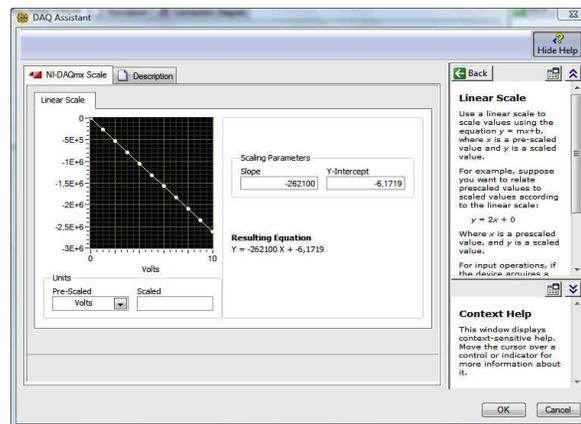


Fig. 108 Formula de calibración para la carga

139

De la misma forma se realizó la calibración de la celda de carga, como ejemplo Tabla 36 que mide el par generado, dándonos como resultado:

$$-1400x - 0.1626 = Tor$$

114

Donde

x Registro de carga por el sensor en mV.

Tor Medida del par.

Para realizar la calibración de las celdas de carga, Fig. 109, se desarrolló un muestreo con valores de carga conocidas, los cuales, se analizaron resultando en funciones representantes del comportamiento del sensor, el cual se muestra en la Tabla 35 y Tabla 36.

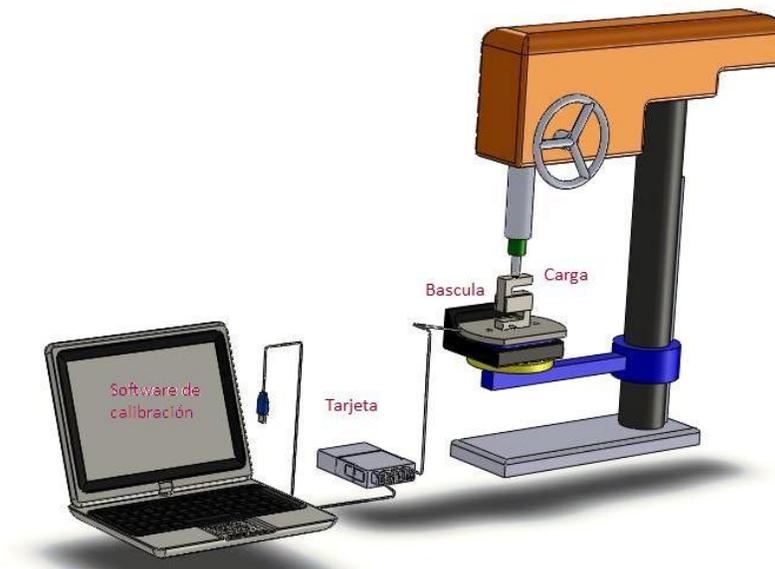


Fig. 109 Calibración de las celdas de carga

Tabla 35 Ejemplo de muestreo para calibración del sensor de carga

Número	Medición(Kg-f)	Gráfica-Rango (0-2000 lb)
0	-2,277	<p>El gráfico muestra un eje horizontal (X) que representa el número de muestreo (de 0 a 10) y un eje vertical (Y) que representa la medición en Kg-f (de -100 a 600). Los puntos de datos están conectados por una línea recta que muestra una correlación positiva fuerte.</p>
1	68,68	
2	138	
3	206,76	
4	277,3	
5	396,8	
6	418,51	
7	490,01	
8	561,92	

140

Tabla 36 Ejemplo de muestreo para calibración del sensor de par

Número	Medición (Kg-m)	Gráfica-Rango (0-150 lb)
0	8,2	
1	11,941	
2	15,756	
3	19,421	
4	23,385	
5	27,083	
6	30,924	
7	34,801	
8	38,789	

5.4 Programación de tareas

Para realizar el programa, se considero principalmente el objetivo del ensayo tribológico basado en la técnica de las cuatro bolas de acero lubricadas, el cual es estudiar los efectos producidos por el fenómeno de fricción y su comportamiento con forme a las variaciones de los parámetros, considerando principalmente, el material lubricante utilizado. Para esto se consideran los elementos principales para el desarrollo del programa, como son:

- El proceso de la tarea.
- El flujo de información.
- Las variables que se involucran.
- Los resultados que se pretenden obtener.
- Seguimiento de la información.

Hay que precisar que este sistema tiene como objetivo principal, no solo los resultados del proceso, sino también, él como se produjeron dichos resultados, ya que este sistema se desarrolla para una máquina de ensayos de laboratorio.

Por lo cual la programación se inicia desde la definición del proceso (La cual se muestra en los capítulos anteriores), ya que, la programación se define por la secuencial de operaciones que el sistema debe de realizara para ejecutar una tarea en específico. El Grafcet desarrollado en los capítulos anteriores, fue la herramienta para desarrollar el programa para cada una de las tareas.

5.4.1 Flujo de mando

El programa fue desarrollado en forma de bloques funcionales como se muestra en la Fig. 110, los cuales desempeñan una actividad específica, para posteriormente combinarse y formar una serie de operaciones que comprendan una tarea, estas se enlistan en la Tabla 37.

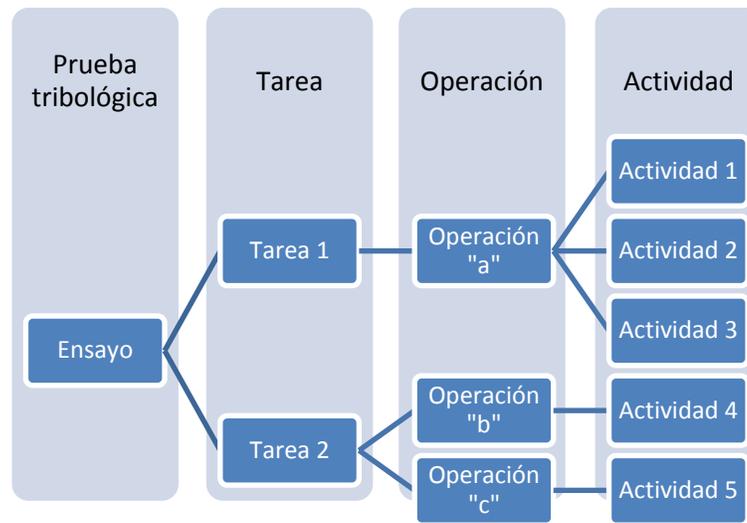


Fig. 110 Flujo de programación

Tabla 37 Elementos de programación del sistema

Actividades	Operaciones	Proceso
Registro de datos.	Registro de datos de usuario	Registro de usuario
Carga de parámetros.	Definición de parámetros de prueba	Cargar parámetros de prueba
Apertura válvula reguladora.	Colocación de contenedor	Preparación de sistema
Cierre válvula reguladora.	Cierre de contenedor	Proceso de prueba
Activación válvula 3-2.	Calentamiento de sistema	Liberación de contenedor
Desactivación válvula 3-2.	Aplicación de carga	Presentación de datos
Activación válvula 2-2	Aplicación de giro	Selección de siguiente paso
Desactivación válvula 2-2	Monitoreo de parámetros	
Desfogue neumático.	Almacenado de datos	
Elevación de temperatura.	Paro de giro	
Inicio y paro de motor.	Liberación de carga	
Detección de carga.	Apertura de contenedor	
Detección de par.	Creación de de reporte	
Detección de temperatura.	Selección de siguiente paso	
Tarea	Ensayo tribológico	
Ensayo de extrema presión	Ensayo tribológico basado en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas	
Ensayo de no extrema presión		
Ensayo no normalizado		

La programación se realizó en el software LABVIEW, Fig. 111, cada uno de los elementos de programación, se programó con el objetivo de facilitar su entendimiento, y la interacción entre el sistema y el usuario.

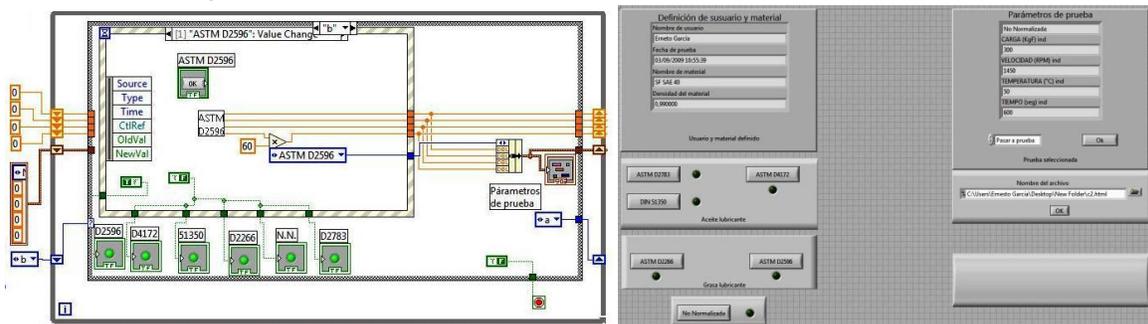


Fig. 111 Ejemplo de programación

5.4.2 Variables de programación

Todo sistema automatizado, está controlado por variables que limitan o describen cada actividad, estas variables se clasificaron dos tipos:

- Variables de sistema: Estas variables se programa de forma básica en el sistema y el usuario no puede modificarlas.
 - Parámetros de detección del contenedor.
 - Carga de cierre.
 - Tiempo de equilibrio.
 - Par de cerrado.
 - Par límite de la prueba.
 - Tabla de almacenaje.
 - Carga de apertura.
 - Par de apertura.
 - Tiempo de desfogue.
- Variables de prueba: Estas variables, son las que definen las características del ensayo que se realizara.
 - Nombre de usuario
 - Fecha de prueba
 - Nombre del materia lubricante
 - Densidad del material lubricante
 - Parámetros de prueba
 - Carga
 - Velocidad
 - Temperatura
 - Tiempo
 - Archivo de almacenaje.

Nota: Los parámetros de prueba, son cargados como parámetros del sistema o seleccionados por el usuario, dependiendo de la prueba que se desee efectuar.

5.4.3 Automatización de tareas

La automatización de tareas se divide en dos conceptos principales, los cuales son:

- Tareas físicas: Son las tareas realizadas por actuadores ya sea eléctricos o neumáticos (STE, del sistema), al generar señales de activación generadas ya sea por la secuencia programada o por cambios en el estado del sistema.
- Tareas de programación: Estas tareas, representa las actividades realizar en el manejo de información del sistema, ya sea en el almacenamiento, cambios o estado de la información.

Estas tareas, definen el inicio, progreso y fin del ensayo.

Al cumplirse o detectar un cambio en el sistema, ya sea por el progreso del ensayo o adecuación de alguno de los parámetros de la prueba, se genera una señal digital, la cual activa el dispositivo encargado de realizar una actividad en específico.

Un ejemplo de ello, es la estabilización de temperatura en el contenedor. Esta tarea, está integrada tanto por el monitoreo de la variable del sistema, que al rebasar un valor específico se envía una señal a una tarjeta de salidas digitales,

Tabla 38, la cual controla un relevador de activación del STE: térmico, estos se muestra en la Fig. 112.

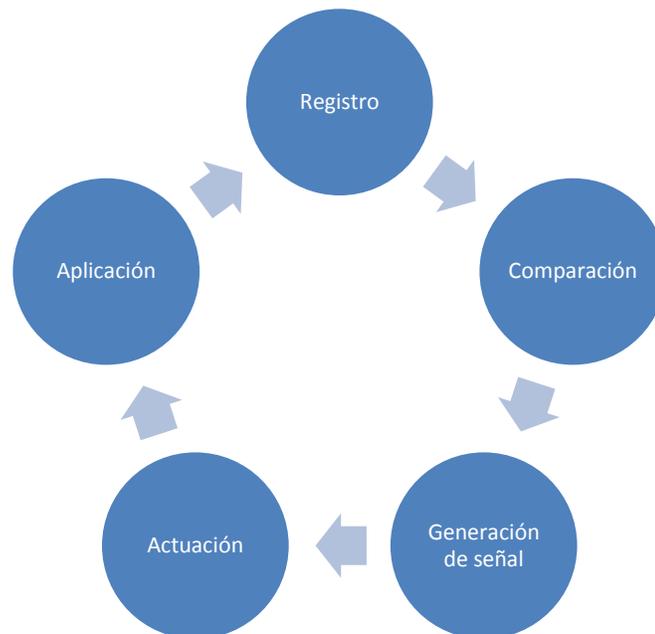


Fig. 112 Diagrama de flujo de tareas para la automatización del STE: Térmico

Tabla 38 Características de la tarjeta de salidas digitales

	Tarjeta de salidas digitales 9472
	8 Canales
	Rango: 6 – 30 V DC
	Temperatura de trabajo: -40 a 70 °C

Cada uno de estos canales, está dirigido a realizar una actividad en específico, desde la apertura o cierre de la válvula reguladora, hasta el desfogue de la carga aplicada.

5.4.4 Construcción de programa.

La programación de los diferentes ensayos, se definió como un sistema secuencial de tareas y operaciones, la cuales, por la naturaleza de los ensayos de ser secuencialmente iguales, solo distinguidos por los valores que toman algunas variables. Se construyo una estructura básica la cual, guía de forma fluida tanto la ejecución de la prueba, como la obtención de los valores definatorios de la misma.

La base de esta estructura, la conforman las operaciones que describen la prueba, estas al irse procesando, realizan tareas que dan como resultado un ensayo exitoso, el cual es comprobado con los datos obtenidos al finalizar dicho ensayo.

- Programación de variables: La programación cuenta con dos tipos de variables, las numéricas y las alfanuméricas. La plataforma de LabView compre diversos campos con los cuales se introduce las variables tanto numéricas como alfanuméricas, cada una guarda una forma diferente dependiendo del uso y de las características de la variable. Estas pueden ser, los mostrados en la Fig. 113:

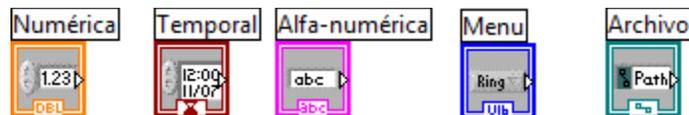


Fig. 113 Tipos de variables para programación.

- Lectura de señales: Para introducir esta clase de variables al sistema, se utilizan diversas herramientas de la plataforma, la cual combina, tanto la plataforma de LabView como el software de adquisición de datos llamado Signal Express. Para esto se utilizan cuadros funcionales, Fig. 114 los cuales agrupan tanto el llamado de la señal, como las características de esta:

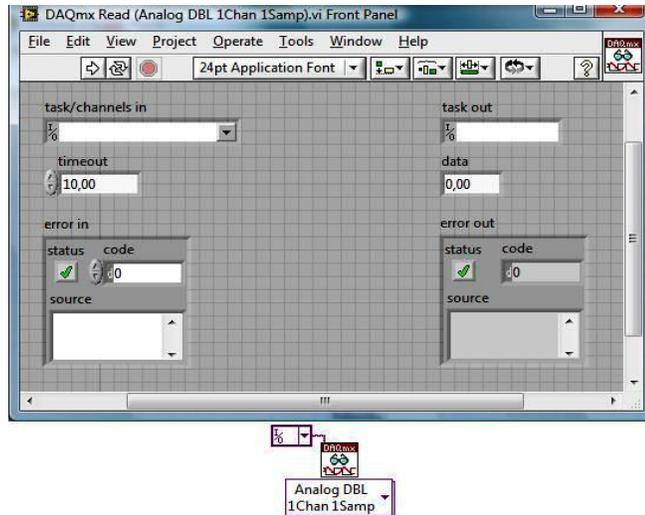


Fig. 114 Adquisición de señales

Estas señales pueden ser analógica, digitales, contadores, etcétera.

- Variables de salida: Cada una de estas se realiza para desarrollar una actividad física del sistema, esta pueden ser analógicas, digitales, contadores, etcétera. Para este proyecto se utilizó una generación de salidas digitales (12 C. D.), las cuales activan a diferentes relevadores, los cuales, sirven como interruptores (si son necesarios), Fig. 115. Estas señales al igual que las de entrada, son programadas por medio de cuadros funcionales, los cuales definen:

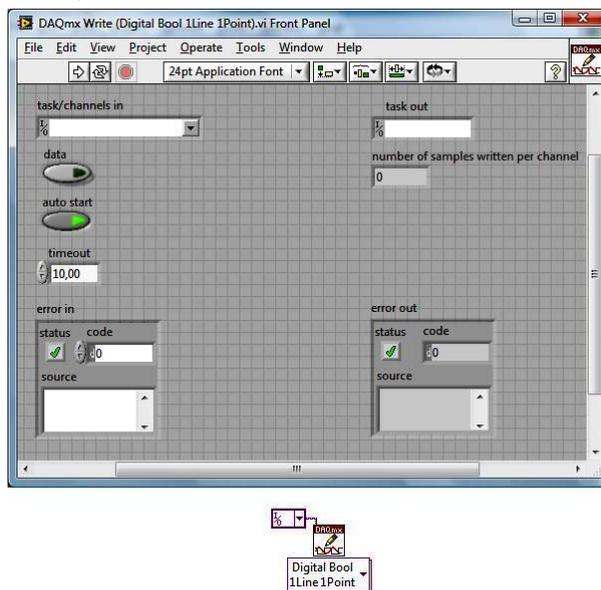


Fig. 115 Generación de señales

- Menú de selección de tareas, Fig. 116: Esta función se define con forma a una combinación de variables, las cuales nombren tanto la función como las actividades y por lo tanto el proceso que se desarrolla en dicho apartado:

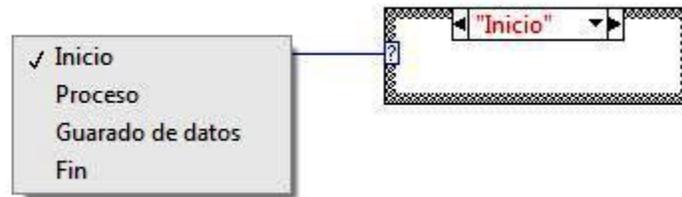


Fig. 116 Selección de menú

- Programación de una función, Fig. 117: Algunos parámetros están en función de variables, la cuales las define el usuario dependiendo de la prueba que desarrollaran. Esto se programa un cuadro específico como por ejemplo:

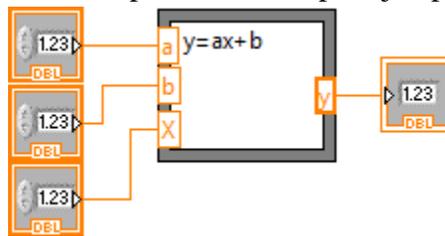


Fig. 117 Ejemplo de definición de función

- Cronómetro, Fig. 118: Esta herramienta controla la activación o desactivación de las operaciones dependiendo el tiempo transcurrido.

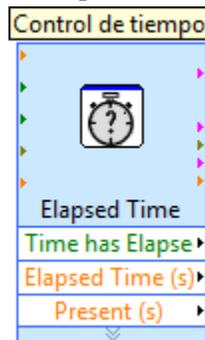


Fig. 118 Herramienta de control de tiempo

5.4.5 Muestreo de monitoreo y generación de reporte

El objetivo de la inferencia estadística es sacar conclusiones acerca de una población utilizando una muestra de la misma. La mayoría de los métodos usados, utilizan una muestra aleatoria. Es decir si la población contiene “N” elementos y va a seleccionarse una muestra “n” de ellos, y cada una de las $N!/(N-n)!n!$ tiene una probabilidad igual de ser seleccionada, entonces el procedimiento empleado se llama muestreo aleatorio.

Sin embargo, los ensayos tribológicos desarrollados en este sistema, no cuentan con una variable temporal igual, ya que una prueba puede ir desde los 10 segundos hasta las 20

horas, dificultando realizar un muestreo similar para ambas pruebas, esto ocasiona que si el registro se hiciera en espacios temporales corto, en la prueba de 20 horas tendríamos una cantidad elevada de datos innecesarios o en caso de que se tomen períodos de tiempo elevados en las pruebas de corta duración no se contaría con datos suficientes.

Para eso se puntualizaron dos tipos de muestreo:

1. Muestreo de monitoreo: Este muestreo está basado en la obtención de datos provenientes de la tarjeta de adquisición de datos, el cual se basa en una frecuencia de la tarjeta. Esta regula la entrada de datos presentada en pantalla por las gráficas y tabla mostradas en la Pantalla de Presentación de Prueba.
2. Mostrar de reporte: Este muestreo se desarrollo con el objeto de no sobre saturar de datos el reporte generado para representar la prueba, para esto se definió una fórmula matemática, la cual tomando como variable el tiempo de prueba, nos arroja un número determinado de muestras, las cuales son guardadas y posterior mente impresas en el reporte final.

Con estas consideraciones, se logró cubrir de forma satisfactoria tanto las necesidades de monitoreo de las variables que controlan el proceso, como la definición del valores relevaste que representen la prueba realizada.

5.5 Interfaz Hombre-Máquina

La automatización de un sistema, se dirige hacia la realización de tareas, las cuales sean difíciles, costosas, peligrosas, precisas y/o fuera de los parámetros humanos de reacción. Sin embargo la automatización de los sistemas, no elimina por completo la intervención humana en el desarrollo de las actividades.

5.5.1 Análisis de operaciones

Al desarrollar el sistema de control y automoción, una de las principales actividades fue el análisis de operaciones, el cual se realizo con un enfoque general, con el objetivo de incluir todos los elementos que intervienen en el sistema.

Considerando los siguientes conceptos, se realizo un estudio de operaciones, según el cumplimiento de estos.

- Definición del usuario
- Seguridad de operación y equipo
- Administración de información
- Conocimientos requeridos
- Intereses del usuario

El estudio se realiza mediante una jerarquización de nivel la cual se representa como se muestra en la Tabla 39:

- Primer nivel: Son las tareas esenciales que la interfaz debe de realizar para que la prueba se lleve a cabo (No pueden ser cambiadas u omitidas)
- Segundo nivel: Definen las características de funcionamiento de la interfaz, (puedes elegir entre dos o más opciones)

- Tercer nivel: Define operaciones específicas del sistema según el nivel de usuario (valores numéricos que definen la prueba)
- Cuarto nivel: Registro de parámetros básicos que rigen el comportamiento de la prueba

Tabla 39 Clasificación de operaciones

Operación	Primer nivel	Segundo nivel	Tercer nivel	Cuarto nivel
Registro de datos de usuario			x	
Definición de parámetros de prueba			x	
Colocación de contenedor	x			
Cierre de contenedor		x		
Calentamiento de sistema	x			
Aplicación de carga	x			
Aplicación de giro	x			
Monitoreo de parámetros		x		
Almacenado de datos		x		
Paro de giro	x			
Liberación de carga	x			
Apertura de contenedor		x		
Creación de de reporte				x
Selección de siguiente paso		x		

5.5.2 Modelado del usuario

La designación del usuario se realiza con forme a una representación del mismo con referencia a las operaciones realizadas por el sistema:

- Jerarquización en la empresa (en este caso, escuela)
- Nivel de conocimientos del sistema
- Nivel de interés de la prueba
- Prioridad de proyecto
- Nivel de definición de resultados
- Conocimientos teóricos

Este sistema nos permite definir un rango de importancia, esto se observan en la Tabla 40:

Tabla 40 Calificación de usuario

Nivel	Calificación
Elevado	3
Medio	2
Bajo	1
Nulo	0

Para esto se caracterizan tres niveles de usuario, mostrados en la Tabla 41:

Tabla 41 Nivel de usuario

Nivel de usuario	Rango
Administrador (alto)	18- 13
Proyectista (medio)	12-7
Usuario (bajo)	6-0

Como este estudio está dirigido al usuario y como para esto se tomo como parámetro la clase de sistema “Hombre- Máquina” impartida, se definen los siguientes valores según diferentes participantes del estudio, Tabla 42.

Para evitar una jerarquización influenciada por otros factores no concluyentes, los nombres de los participantes no se mostrarán, sin embargo se clasificarán por profesión.

Grupo:

- Maestro
- Ing. Mecánico a (diseñador)
- Ing. Mecánico b
- Ing. Industrial
- Médico a (labora en institución psiquiatría)
- Médico b (estudiante)
- Médico c (estudiante)
- Enfermera
- Doctor

Tabla 42 Modelado de usuario para diseño de la interfaz

Individuos	Parámetros						Total	Nivel
	A	B	C	D	E	F		
Maestro	3	2	2	1	2	2	12	Alto
Ing. Mecánico a (diseñador)	2	3	3	3	3	3	17	Alto
Ing. Mecánico b	2	1	2	2	2	1	10	Medio
Ing. Industrial	2	0	1	1	1	1	6	Medio
Medico a	1	1	1	1	1	0	5	Bajo
Medico b (estudiante)	1	1	1	1	1	0	5	Bajo
Medico c (estudiante)	1	1	1	1	1	0	5	Bajo
Enfermera	1	1	1	1	1	0	5	Bajo
Doctor	3	3	3	3	3	3	18	Alto
Ing. Mecánico b (diseñador)	2	2	3	3	3	3	16	Alto

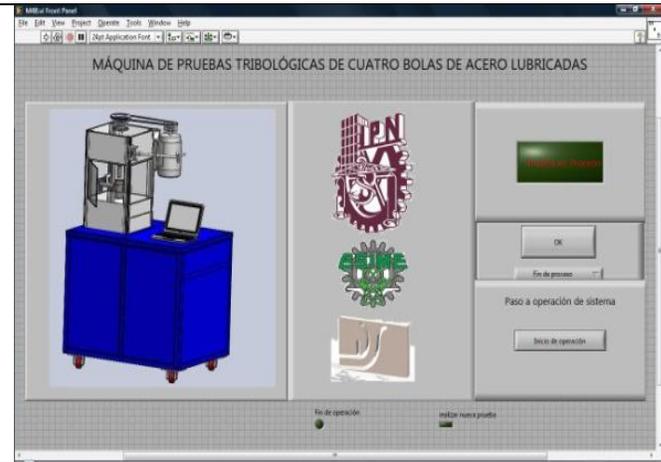
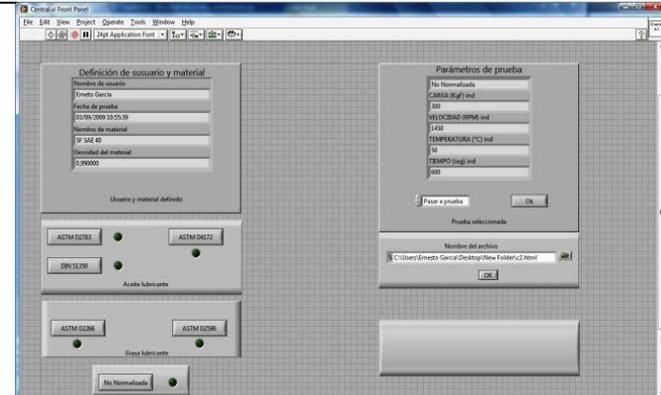
5.5.3 Estilo de la interfaz

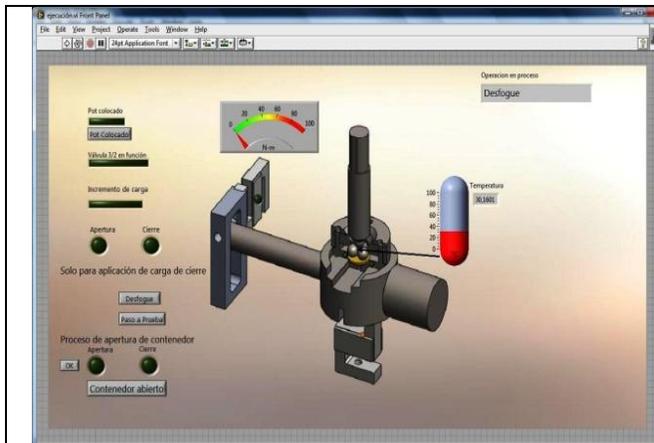
La interfaz puede ser vista como un diálogo entre el ordenador y el usuario. Por lo cual el estilo de seleccionado para el diseño de la interfaz tiene un gran efecto en las actividades desarrolladas.

Existen diferentes estilos de interfaz. En este proyecto, se utilizó una combinación de estilo, destacando el de ventana. La plataforma de programación de LabView, se compone de ventanas principales, una de ellas, la dedicada a la programación de código fuente, en la cual se define la programación aun que de forma gráfica, se define el proceso del programa. Y la segunda ventana, la cual da al usuario una pantalla de trabajo básica, la cual, representa de forma gráfica la programación desarrollada en la ventana fuente.

Para el desarrollo de la interfaz, se utilizó esta pantalla como sistema SCADA, Tabla 43. Combinando la programación de apertura y cierre de ventanas, generación de iconos, desarrollo de menús y la visualización de ejecución por medio de señales visuales, se desarrolla un programa básico que controla el funcionamiento de la máquina de ensayos tribológicos, obteniendo resultados satisfactorios.

Tabla 43 Tabla de pantallas que contiene el sistema

Pantalla	Características
	Nombre: Pantalla principal
	Contenido: Figura principal de la máquina
	Juego de logos representativos
	3 Señales de tarea en verde
	2 Botones de activación
1 Menú seleccionador	
Letrero principal	
	Nombre: Pantalla Central
	Contenido: 2 Listas de presentación de datos
	Menú de selección de prueba
	Menú de definición de datos
	6 indicadores de operación
Espacio para definir dirección de archivo	
2 Botones de activación de tarea	



Nombre: Pantalla de preparación de prueba

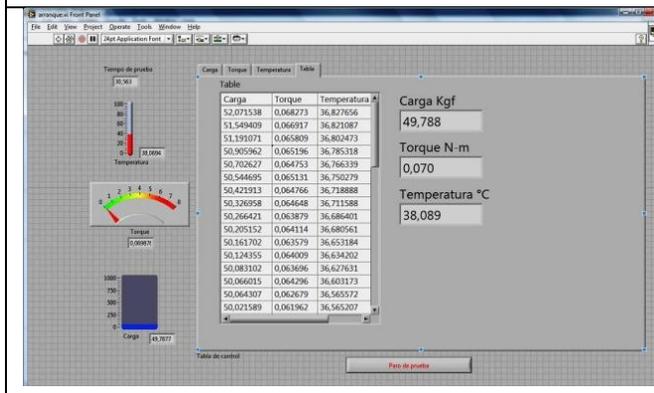
Contenido: Imagen representativa del sistema

2 Medidores físicos del sistema

6 Botones de activación de tarea

10 Indicadores de operación

Espacio de opresión en curso



Nombre: Pantalla operación

Contenido: 4 Pestañas de selección

3 Medidores físicos del sistema

3 Gráficas de variación de estado

1 Tabla de registro de datos

1 Botón de desactivación de tareas

Estas pantallas, se abren en cuanto alguna acción que forme parte de la programación las llame y no se cierran hasta que las tareas que ejecutan sean terminadas o abortadas. En el proceso de prueba el número máximo de pantallas que se mantendrán abiertas en una operación son 4.

5.6 Elementos integrantes de la máquina de ensayos tribológicos

El diseño de un sistema integral, comprende desde el estudio del problema, el diseño y construcción del prototipo. Para ello se presentan los subsistemas integrantes del mecanismo definido para desarrollar pruebas tribológicas basado en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas.

5.6.1 Subsistema neumático

Ya se ha mencionado los diferentes componentes que integran este subsistema, a continuación se presenta la forma final a la cual llevaron las bases del diseño antes expuestas, representadas físicamente en la Fig. 119.



Fig. 119 Elementos neumáticos que integran el subsistema

Elementos que integran el subsistema respecto al flujo de la línea de aire:

- Filtro de aire con manómetro.
- Filtro de aire a 25 micras
- Válvula reguladora.
- Válvula 2-2.
- Válvula 3-2
- Actuador

5.6.2 Subsistema térmico

El diseño de un sistema el cual controle una variable ambiental como es el caso del subsistema térmico, necesidad de estar en contacto directo con las variaciones que se presentan en la prueba, es por eso que las etapas anteriores a la construcción del prototipo se definieron la posición más adecuada, como se muestra en la Fig. 120



Fig. 120 Elementos del subsistema térmico

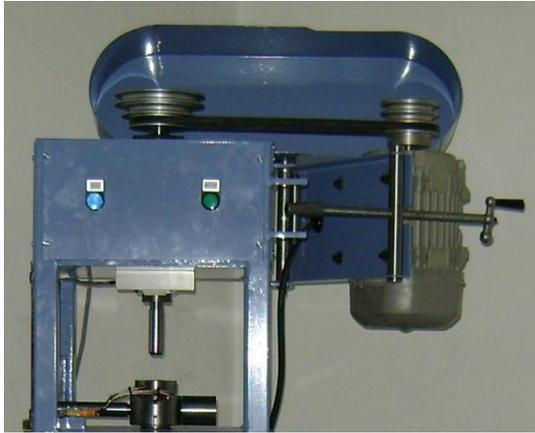
Elementos del subsistema térmico:

- Contenedor
- Conexiones de resistencias
- Conexión de sensor de temperatura

La Fig. 120 nos muestra como las fases de diseño nos guiaron hacia la construcción e instalación del subsistema térmico, el cual cumple con las necesidades del ensayo.

5.6.3 Sistema de giro

Este sistema fue diseñado para suministrar tanto potencia como movimiento durante el ensayo, de las bases de este surgió el ensamble mostrado en la figura tal, el cual cumple con las necesidades del sistema.



Elementos del sistema de giro

- Motor
- Polea motriz
- Polea de transmisión
- Flecha de transmisión
- Boquilla sujetadora

Fig. 121 Subsistema de giro

5.6.4 Prototipo

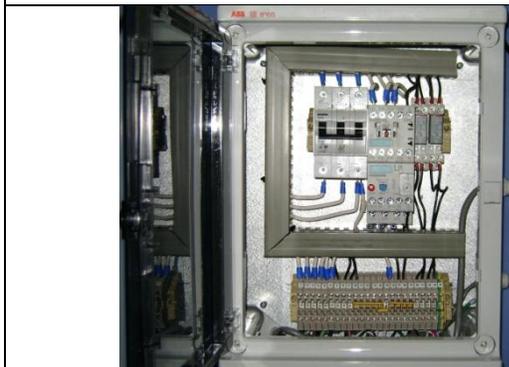
La descripción física de la máquina tribológica de cuatro bolas, se describe en la tabla siguiente:

Tabla 44 Descripción del prototipo.

Imagen	Descripción
	<p>Representación inicial de la máquina: Se encuentra con una cubierta para evitar el que los elementos se empolven y causen tanto deficiencias en el sistema como variaciones en los resultados de los ensayos.</p>
	<p>La presentación de la máquina, muestra un diseño robusto capaz de soportar las condiciones de los diferentes ensayos, así como una distribución ergonómicamente diseñada con forme a estudios ergonómicos dirigidos a la antropometría del mexicano.</p>



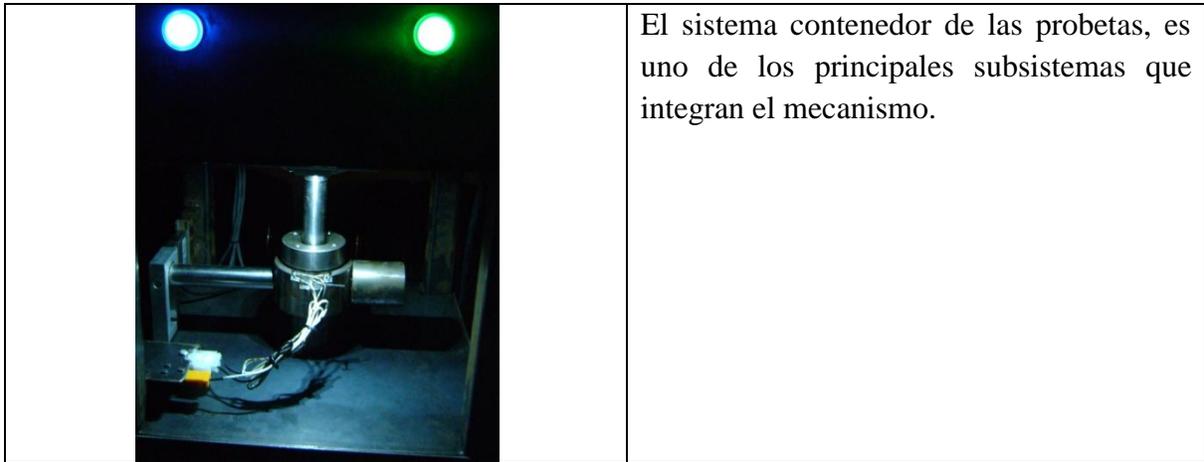
Esta imagen muestra la integración de los diversos componentes, logrando una armonía en forma y estética, ofreciendo una imagen clara del mecanismo completo.



El tablero de distribución de carga esta compuesto por un interruptor termomagnético el cual protege de sobre cargas, un arrancador para el motor, dos relevadores y las diferentes clemas que distribuyen la potencias según sea necesario.



El tablero de control está integrado principalmente por los tarjeta de entadas analógicas y la tarjeta de salidas digitales. Este se complementa con dos fuentes de voltaje las cuales regulan de 120 V AC a 10 y 12 V DC respectivamente.



5.7 Pruebas de arranque

Las pruebas de arranque son esenciales al desarrollar un prototipo, ya que una secuencia la cual ejemplifique el trabajo tanto a condiciones normales como a extremas, arrojarían tanto ventajas del prototipo, como principalmente puntos de observación o fallas del mismo. Las cuales ayudaran al re-diseño de los elementos que conforman el mecanismo.

5.7.1 Pruebas de estado pasivo

Estas pruebas se realizaron con el objetivo de verificar el comportamiento de dos de las variables principales como son, la Temperatura y la Aplicación de carga. Se definen como pruebas de estado pasivo, ya que estas se realizaron sin que el motor estuviese en funcionamiento, lo cual hacer que el sistema se mantenga en un equilibrio mayor y así obtener valores más precisos.

Ejemplo de prueba en estado pasivo, Tabla 45.

Tabla 45 Datos de prueba en estado pasivo

1. Nombre de usuario: Ernesto David García Bustos
2. Fecha de operación : 17/09/2009 9:18:45
3. Nombre del material lubricante: Aceite
4. Densidad del lubricante: N/D

1. Prueba: No Normalizada
2. Carga: 135,000000 Kgf
3. Velocidad: N/D
4. Temperatura: 30,000000 °C
5. Tiempo: 180,000000 seg

Observaciones de la prueba:

La gráfica nos muestra el comportamiento del sistema termico en estudio. Este sistema esta dominado por valores límite, los cuales al superar el valor de estado de la prueba, se desactiva el sistema calefactor. Pero al bajar de un valor programado (el cual esta en función del valor basico de la prueba) se activa el sistema calefactor para elevar la temperatura.

Vemos un comportamiento el cual tiene al equilibrio. Definido con la función, Fig. 122:

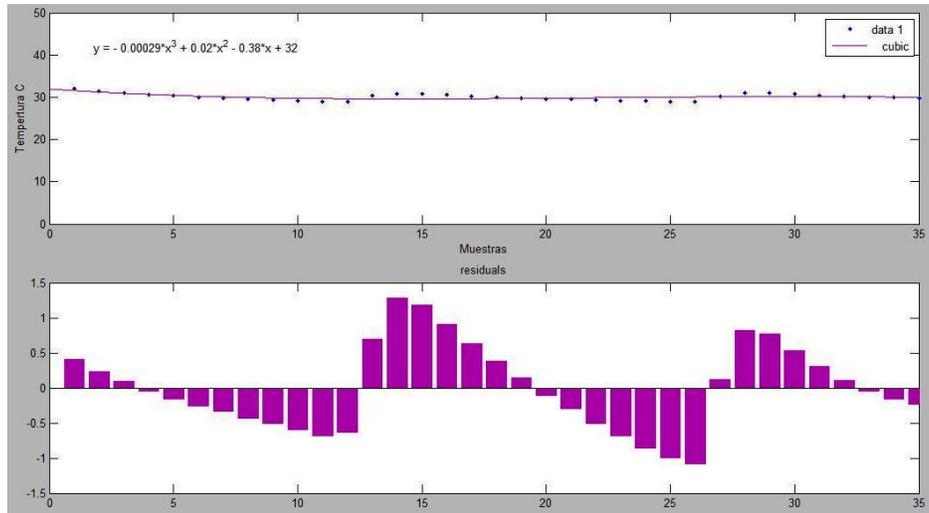


Fig. 122 Gráfica de temperatura

$$y = p1x^3 + p2x^2 + p3x + p4$$

115

Coefficientes:

$$p1 = -0.00029496$$

$$p2 = 0.019703$$

$$p3 = -0.38355$$

$$p4 = 31.919$$

Observaciones de la prueba:

La gráfica muestra el comportamiento de la carga en un periodo de tiempo determinado, Fig. 123, el cual inicia en un valor relativamente elevado al valor requerido para desarrollar la carga, con un posterior descenso sobrepasando el valor requerido. Para posteriormente equilibrarse y mostrar un ligero comportamiento de elevación.

Este comportamiento es cercano al de la función:

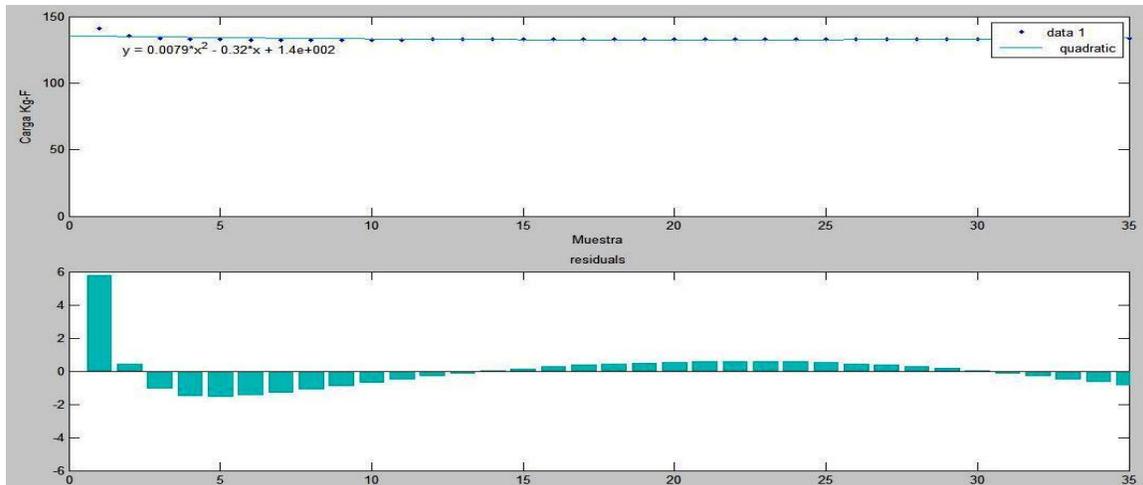


Fig. 123 Gráfica de carga en estado estable

$$y = p1x^2 + p2x + p3$$

116

Coefficients:

$$p1 = 0.0079101$$

$$p2 = -0.31895$$

$$p3 = 135.56$$

Pruebas como esta, se desarrollan para observar el comportamiento del sistema a diferentes condiciones, ajustando el sistema al comportamiento idóneo.

5.7.2 Pruebas de estado activo

Estas pruebas se desarrollan para conocer el comportamiento de cada una de las variables presentes en el fenómeno, conociendo su comportamiento y el funcionamiento del sistema.

Ejemplo de prueba en estado activo, Tabla 46

Características de la prueba

Tabla 46 Parámetros de prueba en estado activo

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 13:54:55
3. Nombre del material lubricante: Móvil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D4172
2. Carga: 40,000000 Kgf
3. Velocidad: 1200,000000 rpm
4. Temperatura: 75,000000 °C
5. Tiempo: 3600,000000 seg

158

Reporte

La prueba en estado activo representa la activación de tosa las funciones del sistema comenzando por el reporte, Fig. 124:

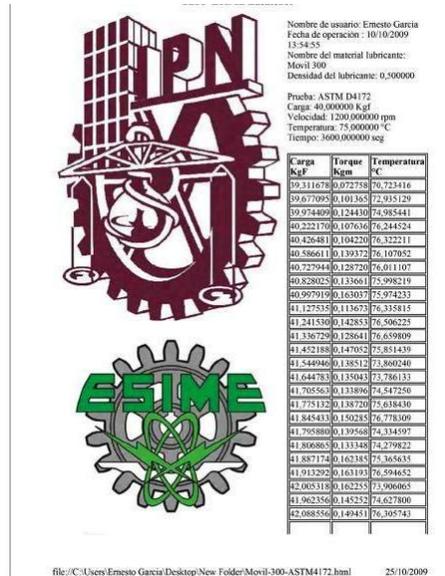


Fig. 124 Ejemplo de reporte de prueba en estado activo

Este reporte se genera en archivo HTML, el cual es compatible con los principales programas tanto de generación de reporte como de tratamiento de datos.

Comportamiento de la aplicación de carga, se muestra en Fig. 125.

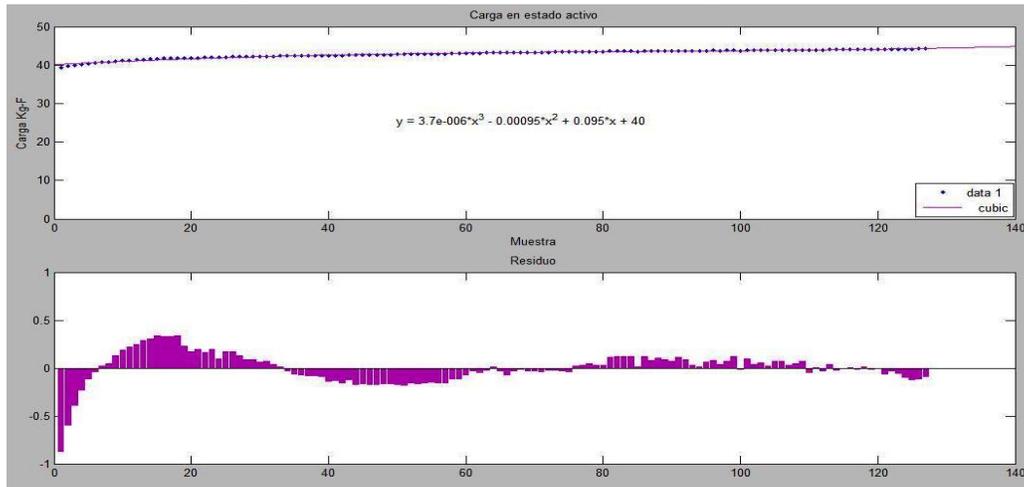


Fig. 125 Gráfica del comportamiento de la carga en estado activo

$$y = p1x^2 + p2x + p3$$

Coeficiente
 $p1 = -0.0002442$
 $p2 = 0.058673$
 $p3 = 40.479$

Como podemos observar el comportamiento del sistema en específico en el comportamiento de la aplicación de la carga, es diferente, dependiendo del valor que se desee aplicar. Se observa que a diferencia del comportamiento presente a presiones elevadas, este registro un aumento en lugar de un descenso en su valor, aunque con poca afectación en la prueba este puede ser significativo en el fenómeno desarrollado.

Comportamiento de la temperatura, se muestra en la Fig. 126.

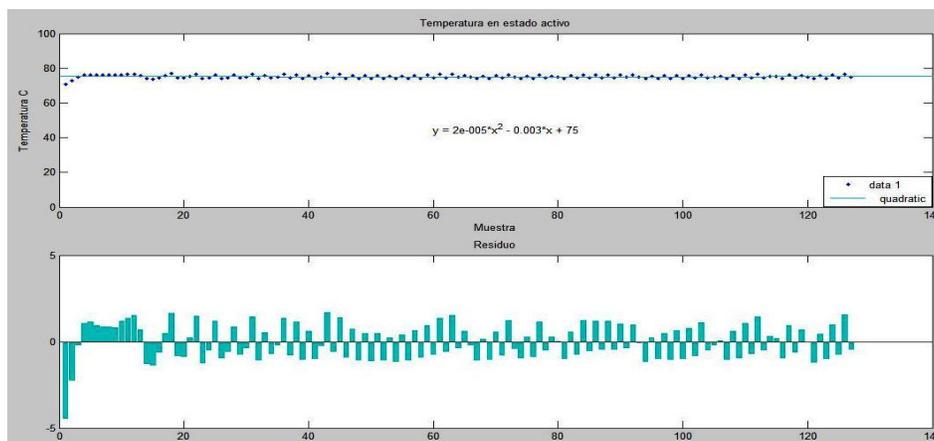


Fig. 126 Gráfica del comportamiento de la temperatura en estado activo

$$y = p1x^2 + p2x + p3$$

118

Coeficiente
 $p1 = 1.9962e-005$
 $p2 = -0.0029762$
 $p3 = 75.184$

Como se puede observar el parámetro temperatura no muestra una diferencia significativa en su comportamiento, ya que este tiende a la estabilidad. Sin embargo los ensayos desarrollados con los parámetros de una prueba de extrema presión de mostraron comportamientos distintos.

160

Comportamiento del par, se muestra en la Fig. 127.

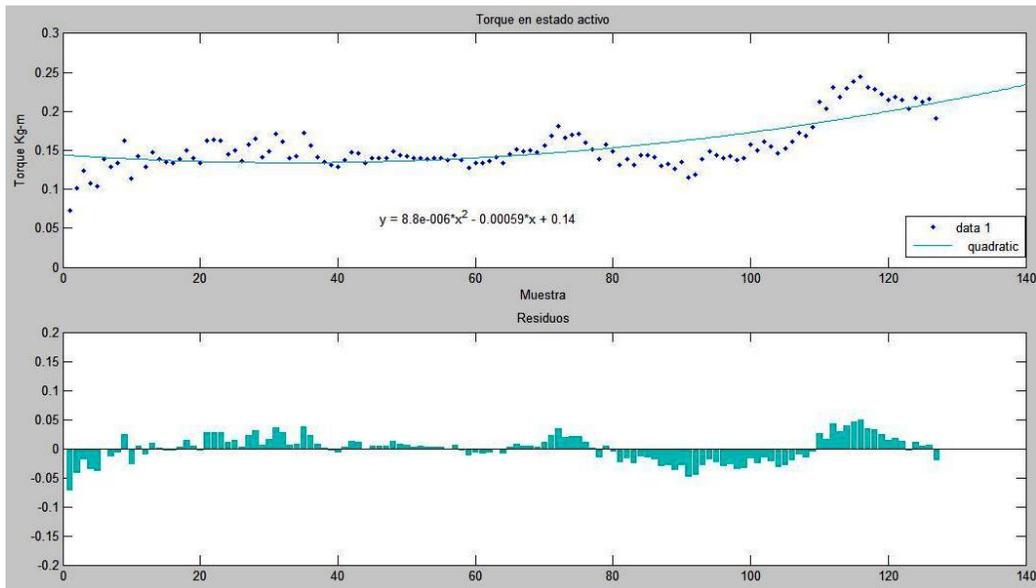


Fig. 127 Gráfica del comportamiento del par en estado activo

$$y = p1x^2 + p2x + p3$$

119

Coefficiente

$$p1 = 8.8277e-006$$

$$p2 = -0.00059244$$

$$p3 = 0.14409$$

En la gráfica se muestra una tendencia al aumento en los valores de par, este comportamiento es coherente con las especulaciones teóricas, ya que al ir avanzando el tiempo la fuerza de fricción aumenta gracias a la ampliación del área de contacto entre las probetas.

Al desenvolver las actividades que desarrolla el sistema, destacan las modificaciones tanto físicas como de programación modificando los resultados, procurando un acercamiento al estado final de factibilidad del sistema.

161

CONCLUSIONES

El proyecto realizado arrojó las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló el control secuencial de una máquina tribológica basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, con una identificación clara de las tareas principales así como de las operaciones que estas integran. Obteniendo un proceso operacional con el que se realizan las actividades para controlar y monitorear las variables principales que son par, velocidad, temperatura y carga.
- Se diseñó y construyó un sistema de control de lógica difusa, el cual registra el comportamiento de las variables, desde la captura de valores, el comportamiento durante el experimento, hasta el despliegue de un reporte que describe el ensayo. Este se implementó mediante una ley de control ad-hoc que se limita a la realización de las pruebas tribológicas.
- Al realizar el diseño del sistema de control, una de las operaciones principales fue el modelado tanto geométrico como matemático de los elementos que lo integran, ya que conociendo su comportamiento, se conformó un sistema complejo que cumple con la normatividad internacional que rige los experimentos realizados en la máquina antes mencionada.
- Se construyó un sistema de control y automatización para una máquina de ensayos, la cual cumple con los objetivos planteados, con insumos existentes en el mercado nacional y con un costo que representa una fracción del de las máquinas ofrecidas en el mercado internacional.

Perspectivas

La máquina de ensayos tribológicos aquí diseñada y construida, cumple con los requisitos funcionales de las diferentes normas internacionales las cuales se diseñaron para conocer las características de los aceites y grasas lubricantes, sin embargo esta máquina cuenta con una prueba denominada no normalizada, que puede ser utilizada no solo para verificar las propiedades de materiales lubricantes, sino también para conocer las propiedades de los

componentes en contacto (sustituyendo las propiedades de las probetas de acero por las del elemento a estudiar).

También, realizando modificaciones al área de trabajo, se pueden adaptar un mecanismo que cuente con un ciclo de enfriado, el cual pueda desarrollar temperaturas bajo cero, con el objetivo de observar el comportamiento de estos materiales a esa clase de temperatura. O adaptar un sistema de aislamiento y extracción de aire, para realizar pruebas al vacío.

Como se puede observar, las posibilidades de mejora y evolución son muchas, las cuales serán consideradas para futuros proyectos.

Además se puede diseñar un subsistema de registro de par más eficiente que al utilizado en este proyecto, empleando tecnología de sensores semiconductores y laser para la medición del par generado.

Al igual que es posible mejorar los aspectos físicos, también la usabilidad del sistema es un parámetro a mejorar, haciendo pruebas de usabilidad del sistema, así como mejorando los aspectos que de estas resulten con oportunidad de mejora.

Trabajos futuros

El diseño de un mecanismo, es susceptible a mejoras la cuales benefician su funcionamiento y calidad de su trabajo por esto se ofrecen las siguientes perspectivas de mejora:

- Desarrollar un subsistema de sensado de temperatura capaz de monitorear las variaciones en el sistema en diferentes puntos que muestren de mejor manera el desarrollo del ensayo.
- Diseñar una cámara de ensayos completamente aislada para desarrollar ensayos al vacío.
- Definir un sistema de sensado de par con una sensibilidad mayor.
- Desarrollar el modelado matemático que define de manera clara el fenómeno que se presenta en arreglo tetraédrico con forma a las fuerzas que se generan.
- Diseñar un subsistema que enfríe la cámara de pruebas para así poder desarrollar ensayos a temperaturas bajo cero.
- Evolucionar la interfaz H-M, con el objeto de agilizar y mostrar de mejor manera los resultados y el fenómeno en tiempo real.



**LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
Y EL CENTRO DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN CÓMPUTO
XI SIMPOSIUM INTERNACIONAL**



**"Aportaciones de las Universidades a la Docencia,
la Investigación, la Tecnología y el Desarrollo
23, 24 y 25 de septiembre de 2009**

**PRESIDENTE HONORARIO
DEL SIMPOSIUM.**
J. Salvador Meza Espinoza

PRESIDENTE EJECUTIVO
Victor Manuel Silva García

COORDINADOR GENERAL
Salvador Pérez Cárdenas

COMITÉ TÉCNICO
Victor Manuel Silva García
(CIDETEC)
Salvador Meza E. (ESIQIE)
Eduardo Rodríguez Escobar
(CIDETEC)
Juan Carlos González Robles
(CIDETEC)
Manuel González Hernández
(UAEH)
Gerardo Ramos Serpa
(Universidad "Camilo
Cienfuegos", Matanzas, Cuba)
Juan Carlos Herrera Lozada
(CIDETEC)

COMITÉ DE ORGANIZACIÓN
Leticia A. Morales Sánchez
Eduardo Vega Alvarado
Guillermo E. Castro Pérez
María de Lourdes Olvera C.

**COMITÉ DE RELACIONES
PÚBLICAS**
Rosa Eunice Echeverría Portillo
Martha Patricia Rico Martínez

**COMITÉ DE PRENSA Y
PROPAGANDA**
Miguel A. Jiménez Cruz
Irma Alonso Sánchez
Guillermo de la Torre Arteaga
Sergio Flores Meza

**COMITÉ EDITOR DE
MEMORIAS**
Adelina Pérez Rosas
Salvador Pérez Cárdenas
Miguel A. Jiménez Cruz
Adelina Rosas Mercado
Patricia Pérez Romero

**COMITÉ DE APOYO
LOGÍSTICO E INFORMÁTICA**
Kristopher Bocaccio Juárez A.
Lorena del Rocío Mayo Monroy
Angélica Guerra Jalmes
Rafael Oropeza M.

**COORDINACIÓN GENERAL
DE MESAS DE TRABAJO**
Adelina Rosas Mercado

MI 18
México, D. F., Junio 25 del 2009

García Bustos Ernesto David, Figueroa Guadarrama Marco Antonio, Rosas
Castro Harry Manuel Vite Torres
P R E S E N T E (\$)

Sirva este conducto para enviarles un cordial saludo y comunicarles que su
ponencia:

**AVANCE TECNOLÓGICO DEL DESARROLLO TOTAL DEL "KNOW-HOW" DE
UNA MÁQUINA TRIBOLÓGICA DE CUATRO BOLAS**

**Ha sido arbitrada por el comité técnico y considerada de relevancia por lo que
ha sido**

ACEPTADA

**Para presentarse con la modalidad de:
Exposición oral_x__ Cartel_____**

La Cuota de Recuperación será de \$1,241.16 (mil doscientos cuarenta y un pesos,
16/100) por trabajo y podrá ser depositada del 1° al 24 de julio y del 3 al 27 de
agosto en la cuenta BANCOMER 0453469360. La cantidad anteriormente indicada
fue fijada atendiendo instrucciones expresas de la SHCP, por lo que agradeceremos
que verifique en su baucher de depósito que se especifique precisamente esa
cantidad. Les recordamos que el original del baucher de depósito deberá ser
entregado en las oficinas de CIDETEC, a la mayor brevedad posible después de
hacer el depósito, anotando en el mismo el título del trabajo y el nombre del primer
autor. Si se requiere factura, por favor avisar oportunamente a CIDETEC para que la
misma sea tramitada.

Para el registro de número de ISSN del disco de memorias del evento se requiere
que, si usted(es) tiene(n) algún inconveniente de que su ponencia aparezca en el
mismo con esa característica, nos lo haga(n) saber antes del día 30 de junio del
presente año, en cuyo caso su ponencia se excluirá de la memoria del evento. De
no recibir noticias en contra, consideraremos que contamos con su beneplácito.

Para cualquier información adicional, ponemos a sus órdenes la página web:
www.simpoweb.ipn.mx y el correo electrónico simpoweb@ipn.mx así como el
teléfono 57 29 6000 extensiones 55387, 52538, 52524 y 55107 en horas hábiles.

Hacemos de su conocimiento que la exposición de carteles se llevará a cabo el
miércoles 23 de septiembre y que los mismos se colocarán entre 8 y 9 de la
mañana.

Las exposiciones orales tendrán una duración de 20 minutos por trabajo; contamos
con proyector de acetatos y cañón y esperamos su presencia 20 minutos antes del
inicio de su mesa de trabajo y su permanencia durante todo el desarrollo de la
misma.

A nombre del Comité Organizador, agradezco su participación que dará sin duda
mayor realce al nuestro evento

Ing. Salvador Pérez Cárdenas
Coordinador General del Simposium

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO A:

ERNESTO DAVID GARCÍA BUSTOS

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN CON LA
PONENCIA

AVANCE TECNOLÓGICO DEL DESARROLLO TOTAL DEL “KNOW-HOW” DE
UNA MÁQUINA TRIBOLÓGICA DE CUATRO BOLAS

PRESENTADA EN EL

11° SIMPOSIUM INTERNACIONAL

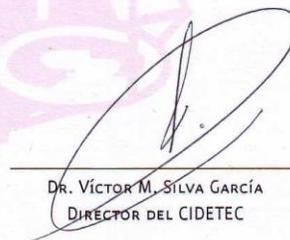
“APORTACIONES DE LAS UNIVERSIDADES A LA DOCENCIA, LA INVESTIGACIÓN,
LA TECNOLOGÍA Y EL DESARROLLO”

CELEBRADO LOS DÍAS 23, 24 Y 25 DE SEPTIEMBRE DE 2009, EN MÉXICO, D.F.

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”



ING. A. SALVADOR PÉREZ CÁRDENAS
COORDINADOR GENERAL DEL SIMPOSIUM



DR. VÍCTOR M. SILVA GARCÍA
DIRECTOR DEL CIDETEC



Avance Tecnológico del Desarrollo Total del “Know-How” de una Máquina Tribológica de Cuatro Bolas

Figueroa Guadarrama Marco Antonio
SEPI. ESIME. Azcapotzalco IPN.
mafguadarrama@hotmail.com

Rosas Castro Harry
SEPI. ESIME. Azcapotzalco IPN.
harry_rocas@yahoo.com.mx

García Bustos Ernesto David
SEPI. ESIME. Azcapotzalco IPN.
edgb007@hotmail.com

Manuel Vite Torres
SEPI ESIME Zacatenco IPN
drmanuelvite9@hotmail.com

Abstract

This work was made with the purpose of presenting the advance referring to “know-how” that it allows the technological development of a tribology four ball machine in lubricated condition; obtained by students of the masters in engineering of manufacture of SEPI ESIME Azapozalco and investigators of tribology laboratory of SEPI Zacatenco, IPN.

Palabras clave: Máquina tribológica de cuatro bolas, lubricación, desgaste.

1. Introducción.

El desarrollo tecnológico nacional se desenvuelve de tal manera, que busca con sus procesos de investigación la generación de nuevos elementos que ayuden a la industria manufacturera mexicana, la cual demanda satisfacer de manera urgente necesidades cotidianas de una forma versátil y rápida, esto a su vez está relacionado a una disminución de costos. En la mayoría de los procesos de manufactura conocidos se presenta el fenómeno de fricción y desgaste, del cual se tienen pocos estudios en México por ejemplo: los factores que lo originan, que efectos causa y las maneras más efectivas para prevenirlo; lo que conlleva a alargar la vida útil de las piezas en las que se presenta este fenómeno.

Los centros de investigación nacionales, generalmente recurren a maquinaria y equipo extranjero para resolver estos problemas, los cuales, son de difícil acceso y generalmente de un costo significativo, encareciendo los beneficios que se obtienen de las pruebas que se realizan con ellos, asimismo se fomenta la adquisición de tecnología y productos extranjeros, en lugar de generar los propios. México cuenta con los recursos

científicos, tecnológicos y económicos necesarios para poder desarrollar particularmente, máquinas tribológicas con componentes adquiridos en el mercado nacional, que sean capaces de generar resultados con estándares internacionales, a un costo accesible.

La máquina tribológica de cuatro bolas está enfocada a realizar ensayos de extrema y no extrema presión a películas lubricantes, lo que va a contribuir al desarrollo de nuevos lubricantes y aditivos generados a nivel nacional. Esto, dirigido a favorecer la vida útil de piezas lubricadas sometidas a fricción y desgaste, en condiciones de trabajo cotidiano.

El desgaste, definido como la remoción de material, donde existe un desprendimiento de partículas en la interface de dos cuerpos que interactúan con movimiento deslizante, rodante, recíprocante, o la combinación de ellos y sometidos a carga. Es uno de los mayores problemas al que se enfrenta la industria manufacturera, viéndose reflejado en un decremento de la calidad de las piezas fabricadas, y en el peor de los casos, paros de líneas de producción, provocadas por fracturas de piezas en maquinarias. El estudio de las características de los

lubricantes, es de suma importancia, ya que al realizar una selección adecuada se reduce la fricción así como el fenómeno mencionado de manera significativa, mejorando el desempeño de los elementos en operación.

El presente trabajo tiene como parte fundamental, mostrar los avances tecnológicos del diseño y desarrollo, de un prototipo funcional de una máquina tribológica de 4 bolas en condición lubricada, capaz de realizar ensayos de extrema y no extrema presión a películas lubricantes, para obtener las propiedades físicas y mecánicas, presentes durante la operación del tribo-sistema. Además de ello, se puede contribuir a la investigación y desarrollo de nuevos lubricantes, para así lograr mejorar las propiedades mencionadas y poder generar la comparación de los resultados. Todo esto, sustentado mediante las normas internacionales (ASTM y DIN), en donde se muestra la configuración geométrica básica de la máquina y los protocolos de los ensayos referidos. Además, como parte integral del presente trabajo, se muestra un desglose de los sistemas integrantes de la máquina, plano de detalle, y análisis de elemento finito de una de las piezas fundamentales del sistema de sujeción de probetas, así como la base del interfaz hombre-máquina. Con el único objetivo de lograr un desarrollo tecnológico acorde con los estándares internacionales, quedando a disposición para la enseñanza teórico-práctica y de investigación tribológica de las universidades públicas como en los institutos de investigación nacionales.

2. Concepto de Tribología.

Etimológicamente, la palabra Tribología deriva del griego "tribos" que significa rozamiento o frotamiento y "logos" que significa tratado o estudio. La ciencia que se refiere al rozamiento o frotamiento, sin embargo, el concepto de "tribología" fue utilizado por primera vez en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de Gran Bretaña, encabezada por el científico Peter Jost. Fue el 9 de marzo de 1966, fecha que se reconoce como la del nacimiento de la tribología, definiéndola como: "Ciencia y tecnología de estudio a los cuerpos que están en contacto y movimiento relativo así como los fenómenos que de ello se derivan.

En consecuencia la fricción, el desgaste y la lubricación son tópicos fundamentales que sustentan esta ciencia". Ya en este informe se señalaba su carácter multidisciplinario. Posteriormente, se le comenzó a reconocer como fuente de gran potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos (1). En la actualidad hay un número muy importante de publicaciones, tales como, Wear, Tribology Letters, Tribology and International, entre otras que impactan positivamente el desarrollo de esta ciencia interdisciplinaria

Por otra parte, el medio que rodea a los cuerpos que están en contacto y movimiento relativo se le llama "tribo-sistema", el cual va a ser determinante para la respuesta que den los mismos y puede ser seco, lubricado, en vacío, ácido, etc., o al combinación de alguno de ellos, Figura 1.



Figura 1 Análisis de los elementos presentes en un Tribo-Sistema

Los fenómenos tribológicos han sido formalmente estudiados durante muchos años, y comúnmente los resultados de amplios experimentos empíricos han encontrado inmediatas aplicaciones en el campo, solucionando problemas específicos. Sin embargo, el estudio de las superficies y las interfaces ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, gracias a la tecnología del alto vacío, lo que permite preparar y mantener una adecuada caracterización de las superficies a estudiar. Estos adelantos han abierto un amplio rango de estrategias, que permiten entender el fenómeno tribológico a un nivel sin precedentes. Recientemente los microscopios de fuerzas atómicas han abierto un nuevo campo, la nano-tribología, por ejemplo, el estudio del fenómeno a nivel atómico, siendo el responsable del comportamiento tribológico a nivel macroscópico. Adicionalmente, las condiciones de operación de la maquinaria se han vuelto más severas, lo cual ha

generado una necesidad fundamental de entender los fenómenos tribológicos (2).

3. Ensayos en máquina tribológica de cuatro bolas

La máquina tribológica de cuatro bolas, es utilizada para determinar las propiedades físicas y mecánicas de un lubricante (grasa o aceite) sometidas a diferentes rangos de cargas. La flexibilidad de las variables dentro de la prueba como lo son temperatura, carga normal y velocidad, permite recrear las condiciones para aplicaciones normalizadas y específicas. Además de esto, las pruebas que de ella surgen, son fundamentales en el desarrollo para la generación de nuevos lubricantes, así como sus aditivos, con lo que se busca mejorar las propiedades físicas en las condiciones más severas.

La configuración geométrica de dicha prueba consiste, en una bola de acero normalizada a $\frac{1}{2}$ " (12.7mm) de diámetro que gira con carga normal, que interacciona contra otras 3 bolas fijas estacionarias cubiertas con el lubricante a ser examinado (3), Figura 2.

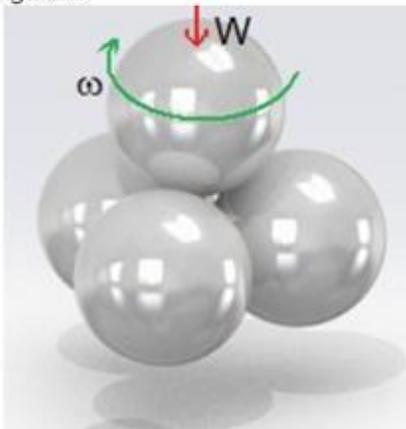


Figura 2 Configuración tetraédrica de las 4 bolas.

Las pruebas se dividen en dos clases:

- No extrema presión. "NEP". Las 4 bolas son sometidas a baja carga (392 N) durante un determinado periodo de tiempo, generando así marcas en los puntos de contacto con lo cual se busca caracterizar al lubricante sometido a la prueba, Figura 3.
- Extrema presión. "EP". Las 4 bolas son sometidas durante periodos cortos de tiempo a elevadas cargas, incrementando estas últimas (desde 58.8 N hasta 7840 N)

secuencialmente hasta conseguir la ruptura de la película lubricante y con esto la soldadura de las 4 bolas.



Figura 3 Marca en el punto de contacto de una de las tres bolas estacionarias

Todo instrumental de laboratorio, que es empleado para realizar investigación experimental, debe cumplir con ciertos requerimientos, los cuales están normalizados de acuerdo a los estándares de la ASTM, (American Society for testing Materials) y/o DIN, (Deutsche Industrie Normen). Esto con el fin de tener una homogeneidad en los parámetros de operación en todas las pruebas y las condiciones ambientales controladas, para que los resultados experimentales puedan ser confiables y reproducibles. Para el caso particular de la máquina de 4 bolas en el listado siguiente se muestran los protocolos en los que deben estar sustentados dichos ensayos:

- Norma ASTM D2266 prueba de no extrema presión para grasa con una carga normal máxima de 392 N, a una temperatura de 75°C y 1200 RPM durante 60 minutos (4).
- Norma ASTM D4172 prueba de no extrema presión para aceite con una carga normal máxima de 392 N, a una temperatura de 75°C y 1200 RPM durante 60 minutos (5).
- Norma DIN 51350 prueba de no extrema presión para aceite con polímeros, con una carga normal máxima de 5000 N, a una temperatura de 60°C y 1450 RPM durante 240, 480 y 1200 minutos (6).
- Norma ASTM D2596 prueba de extrema presión para grasa con una carga normal incremental hasta llegar al punto de soldadura, a una temperatura de 27°C y 1770 RPM durante 10 segundos cada corrida (7).
- Norma ASTM D2783 prueba de extrema presión para aceite con una carga

normal incremental hasta llegar al punto de soldadura, a una temperatura de 35°C y 1770 RPM durante 10 segundos cada corrida (8).

En todos los protocolos antes mencionados, se debe cuidar el reporte de los siguientes parámetros durante el periodo completo de la prueba:

- Tiempo de duración.
- Fuerza normal aplicada.
- Torque producto de la fricción en los puntos de contacto de las bolas.
- La temperatura del lubricante sujeto a la prueba.

Para que la máquina tribológica de cuatro bolas, pueda generar dichos ensayos con valores experimentales reproducibles y cotejables, es necesario dividir los componentes mecánicos y control en los siguientes rubros:

- Sistema de sujeción de bolas.
- Sistema para incrementar la temperatura.
- Sistema de aplicación de carga normal.
- Sistema de transmisión de potencia.
- Sistemas para censar las variables de la prueba
- Sistemas de soporte general de la máquina.
- Sistema de control.

4. Avances del desarrollo tecnológico de la máquina tribológica de cuatro bolas.

El diseño, siendo un proceso iterativo se define como "El arte de imaginar y crear cosas útiles capaces de satisfacer necesidades, manifiestas o latentes, del individuo o de la comunidad". La secuencia que se sigue para el desarrollo de este proyecto se ilustra en la Figura 4.

Dicha secuencia nos guía de forma clara, procurando un avance claro y preciso para así, definir este proceso de la mejor forma, con lo que hemos obtenido hasta el momento los siguientes resultados.

La definición del diseño mecánico de ha derivado tanto de un estudio dimensional de los elementos integrantes de los diferentes sistemas, como de un estudio ergonómico de la antropometría del usuario final de donde se obtuvieron los parámetros dimensionales del prototipo funcional. Llegando a la concepción de un modelo idealizado de

forma, dimensiones y funcionamiento, el cual se ilustra en la Figura 5.

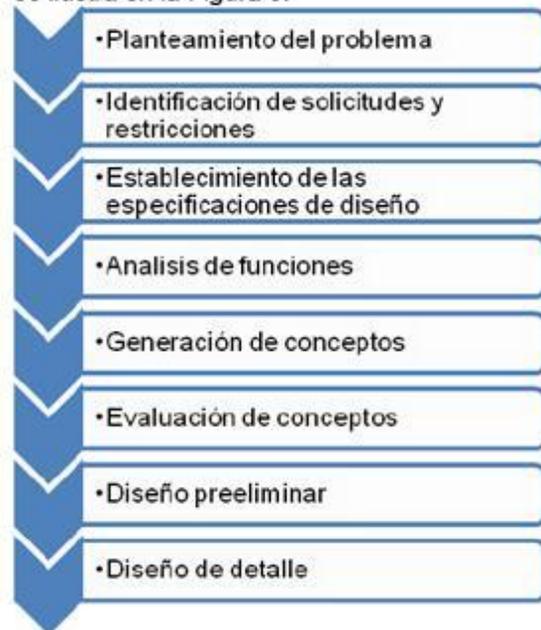


Figura 4. Facetas del proceso de diseño.

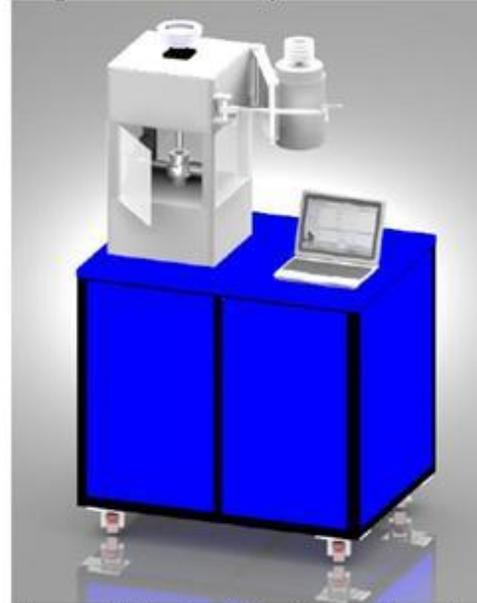


Figura 5 Máquina tribológica de cuatro bolas

Este modelo ilustra de forma general los elementos integrantes de la máquina tribología de cuatro bolas (diseño paramétrico en Solid-Works), igualmente se modelaron los demás componentes que conforman la máquina, como por ejemplo, el sistema de sujeción de bolas y el sistema de carga ilustrados en forma explosionada, Figura 6.



Figura 6 A la izquierda, sistema de sujeción de bolas, a la derecha, sistema de carga.

Continuando con la fase constructiva se realiza el diseño de detalle, con sus respectivos planos, Figura 7. Así como el análisis estructural (basado en cálculo por elemento finito ANSYS) Figura 8 y Figura 9.

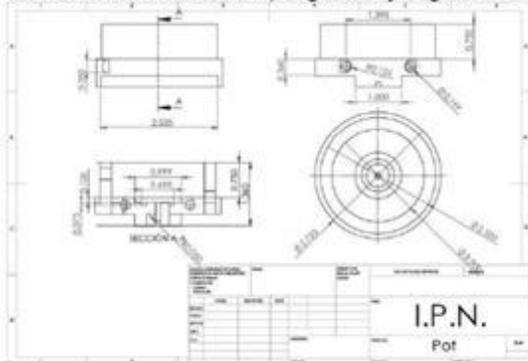


Figura 7 Dibujo de detalle, del "Pot" pieza integrante del sistema de sujeción de bolas.

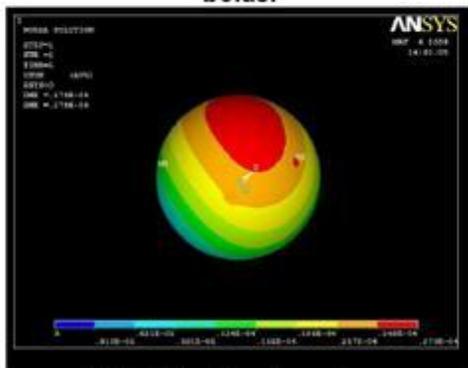


Figura 8. Distribución de esfuerzos en la cuarta bola, con carga máxima.

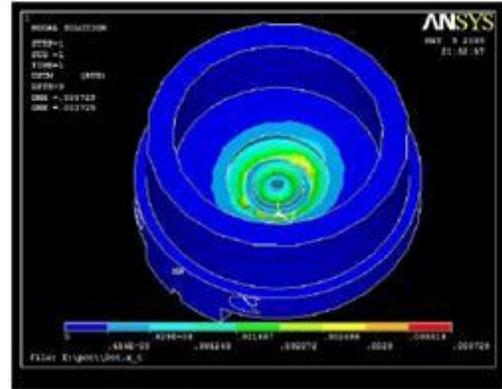


Figura 9 Distribución de esfuerzos en el contenedor de las bolas, con carga máxima.

Una vez que se concluyó la etapa anterior; se procede a la manufactura de las piezas o elementos mecánicos correspondientes. Llevándose a cabo con los procesos necesarios de tal manera que garantizan la calidad y el buen funcionamiento de los elementos desarrollados. Entre las piezas que constituyen la máquina se presenta el Pot (ver Figura 10) por ser imprescindible en el funcionamiento de la misma.



Figura 10 Pot manufacturado.

Este procedimiento fue idéntico para cada una de las cincuenta y seis piezas de los diferentes sistemas integrantes de la máquina. Actualmente, se cuenta con el 100% de los elementos manufacturados.

Respecto a la definición del sistema de control se siguió el mismo procedimiento descrito en la Figura 4. Para el que se inicio con un desarrollo conceptual que definen las necesidades y elementos que conforman el sistema (grafcet) Figura 11. (9) (10).



Figura 11 Diagrama operativo de control
 Para generar el desarrollo del sistema operativo Figura 12, se consideró como objetivo primordial, la interacción visual, entre el operario y el sistema. Para ello, se desarrolló una interfaz gráfica, la cual se basa en un estudio ergonómico, procurando que la misma presente una fácil y accesible operación en su manejo (11). Figura 13.

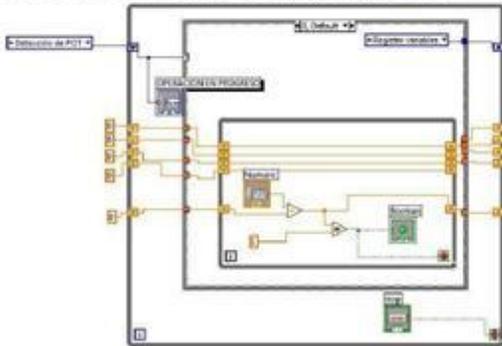


Figura 12 Diagrama de programación

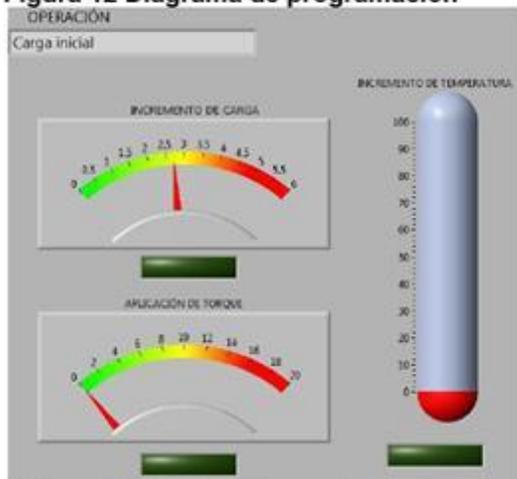


Figura 13 Ventana de prueba en marcha
 Este sistema desarrollado sobre la plataforma de "Lab-View" (Figura 14), no solo ayuda a la simulación sino también es la estructura medular del sistema de control, ya que dicho programa se utiliza como la interfaz hombre máquina, empleado en el funcionamiento normal de ésta, siendo la adquisición de datos, proceso e

interpretación de señales y el despliegue de los resultados obtenidos, las principales funciones de dicho sistema, obedeciendo el diagrama de secuencias lógicas graficet (12), Figura 15.



Figura 14 Pantalla principal de aplicación

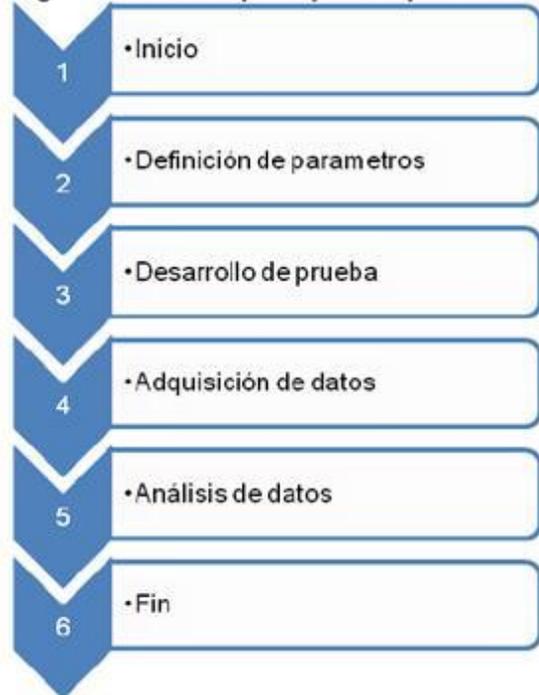


Figura 15 Graficet operativo

Hasta el momento la etapa de construcción ha llevado a obtener como resultado un prototipo funcional de la máquina cuatro de bolas, mostrado en la Figura 16. Sin embargo, faltan aún por concluir la etapa de instalación del sistema operativo, el cual rige la máquina, así como los ensayos correspondientes para finalizar totalmente el proyecto propuesto.

En el mercado internacional se encuentran diversas marcas y clases de máquina dedicadas al desarrollo de las pruebas tribológicas basadas en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas, las cuales cumplen con el objetivo de forma eficiente.

Sin embargo la adquisición de estos equipos, por lo general es de forma complicada y demanda una gran cantidad de recursos tanto económicos como logísticos, generando el encarecimiento y difícil adquisición de los mismos, es por esto que en el mercado mexicano urge desarrollar una máquina competitiva con los estándares internacionales, a un costo razonable.



Figura 16 Avance de máquina tribológica de cuatro bolas.

Algunas ofertas económicas existentes en el mercado son:

IDP Aparatos (13). Esta máquina cuenta con un sistema computarizado para desgaste y extrema presión según normas ASTM D-2266, D-4172, D-2596, D-2783, IP 239, DIN 51350 y otras normas o especificaciones personales, además permite el cálculo del coeficiente de fricción, con un costo de \$ 1,169,992.75

Phoenix Tribology Ltd (14). Esta máquina cuenta con un sistema computarizado para desgaste y extrema presión según normas ASTM D-2266, D-4172, D-2596, D-2783, censado de coeficiente de fricción, software de adquisición de datos, sistema de carga neumática, con un costo de \$1,725, 033.76.

El costo de las máquinas están expresados en Pesos Mexicanos, con un tipo de cambio del día 23 de marzo de 2009 correspondiente a \$ 14.50 pesos por dólar, y \$20.99 pesos por libras esterlinas e incrementándose un 15% de I.V.A. al producto.

Esto muestra, claramente, lo costoso de este tipo de equipos en el mercado internacional pero no así la transferencia tecnológica para su desarrollo.

5. Conclusiones.

- Se desarrolló de forma integral el "Know -How" de la máquina tribológica de cuatro bolas de acero lubricadas con el conocimiento de la ingeniería que requiere este equipo por el grupo de tribología de la SEPI ESIME Zacatenco.

- Se logró abatir en un 75% el costo total del desarrollo de la máquina en comparación de las casas internacionales que la ofertan, lo que en promedio corresponde a \$361,878.31 Pesos Mexicanos.

- Falta por concluir la etapa de instalación del sistema operativo que rige la máquina así como los ensayos de arranque y puesta en marcha.

6. Referencias

1. Dowson, Stephen Paul. *History of Tribology*. New York : Logman Group Limited, 1979.
2. Spencer Nicholas, D y Wilfred T, Tysoe. *Tribology Letters*. 1995. 3.
3. *Tribología y Lubricacion en Ensayo de Banco*. Losada, Carlos, Om, Neyda y Rodriguez, José. 2, Toluca, México : Universidad Autónoma del Estado de México, 2001, Vol. 8.
4. D2266, ASTM. *Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Grease (Foru Ball Method)*. United States : s.n., 2001.
5. D4172, ASTM. *Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Fluid (Foru Ball Method)*. United States : s.n., 1999.
6. 51350, DIN. *Determination Of Shear Stability Of Polymer Containing Lubricaing Oils By the Shell Four Ball Tester*. German : s.n., 1996.
7. D2596, ASTM. *Standard Test Method For Measurement Of Extreme-Pressure Properties Of Lubricating Grease (Four Ball Method)*. United States : s.n., 2002.
8. D2783, ASTM. *Standard Test Method For Measurement Of Extreme-Pressure Properties Of Lubricating Fluids (Four Ball Method)*. United States : s.n., 2003.
9. Angulo Bahón, Cecilio y Raya Giner, Cristobal. *Tecnología de Sistemas de Control*. Catalunya : UPC, 2004.

10. **Charles Spurgeon, E. Balcells, Josep y Romeral, José.** *Automatas Programables.* Barcelona : Marcombo S.A., 1997.

11. **Areny Pallás, Ramón.** *Sensores y Acondicionamiento de Señal.* 4 ta.

12. **Moreno García, Emilio.** *Automatizacion de los Procesos Industriales.* Valencia : CFP CERES-UPV, 1999.

13. **IDP, Aparatos Investigacion - Desarrollo - Produccion.** *Cotización No: 08/1124E.* Buenos Aires : s.n., 03 de Marzo de 2009.

14. **Ltd, Phoenix Tribology.** *Cotización No: 1182.* England : s.n., 23 de marzo de 2009.

del **26** al **28** agosto
4º Congreso Internacional de Sistemas de Innovación
para la **Competitividad '09**
Hacia la Inteligencia Competitiva

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato
y la **Universidad Iberoamericana León**
Otorgan el presente

Reconocimiento

a: Ernesto David García Bustos

por su asistencia al 4º Congreso Internacional de Sistemas de Innovación para la Competitividad que se realizó del 26 al 28 de agosto en León, Guanajuato.

M. A. Atrevedo M.
Miguel Ángel Atrevedo Morales
Director del Dpto. de Ingeniería
de la Universidad Iberoamericana León

Dr. Pedro Luis López de Alba
Dr. Pedro Luis López de Alba
Director General CONCYTEG

Dra. Adriana Martínez Martínez
Dra. Adriana Martínez Martínez
Coordinadora Gral. del SINCO 2009



Guanajuato
Gobierno
del Estado

Consejo
de Ciencia
y Tecnología

Contigo Vamos

www.guanajuato.gob.mx

Bibliografía

1. *Sociedad de tribólogos e ingenieros en lubricación*. s.l. : CONAE (Comisión Nacional de Ahorro de Energía).
2. *All Toyota tribological innovation to realice "Serones" and "Maximise" society*. **Toyoda, Shuhei**. s.l. : Tribology online , 2007.
3. *La simulación por computadora en investigación y desarrollo*. **Julio Enrique Duarte, Flavio Humberto Fernandez Moralez**. s.l. : GEANT, 2005.
4. *Development of industrial tribology in china*. **Quinji Xue, Yongzhen Zhang and Jian Li**. 2007 : Henan University of Science and Technology, Wuhan Research Institute of Material Protection.
5. Ley de ciencia y tecnología. *Diario Oficial de la Federación*. 21-08-2006, Vol. Artículo II.
6. *La ingeniería Mecatrónica*. **Diego, Yolanda G**. 2002, Técnica Industrial, pág. 50.
7. *Development of Industrial Tribology in China*. **Qunji Xue. Yongzhen Zhang, Jian Li**. [ed.] Japanese Society of Tribologists. Kanazawa : s.n., 16-19 de October de 2006, Tribology Online, pág. 10.
8. **Dowson, D**. *History of Tribology*. New York : Longman, 1979.
9. **Kragelskii**. *Friction and Wear*. London : Butter worths, 1965.
10. **Bowden, F.P. y Tabor, D**. *The Friction And Lubrication Of Solids*. . 1950. .
11. **Wills, J George**. *Lubrication Fundamentals*. New York : Mobil Oil Corporation Marcel Dekker, Inc., 1980.
12. *HACCP y lubricación de maquinaria en la industria de elaboración de alimnetos*. **España, Shell**. Estoaña : Alimentación equipo y tecnología, 2000.
13. **ASTM**. *Annual Book of Standars*. Vol. 03.2 1990.
14. **Cecilio Angulo Bahón, Cristobal Raya Giner**. *Tecnología de Sistemas de control*. Catalunya : UPC, 2004.
15. **Moreno, Ramon Piedrafita**. *Ingeniería de la Automatización Industrial*. 2da. México : ALAFAOMEGA, 2004. pág. 675.
16. *Usability evaluation of user interfaces with the computer-aided evolution tool PROKUS*. **Stowasser, Gert Zülch y Sascha**. kaisertrabe : institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab), 2000.

17. **Trinidad, Ing. Jose Luis Soto.** Caracterización mecánica y tribológica de materiales ceramicos obtenidos de residuos solidos mineros. *Tesis.* México : ESIME Zac, 2004.
18. *Standard Test Method for wear preventive characteritics of lubricating grease.* New York : ASTM International, 2001, Vol. 05.04.
19. *Preventing spacecraft failures due to tribological problems.* **Fusaro, Robert L.** Cleveland : NASA, 2001, Vol. 210806.
20. **T.A., Stolarski.** *Tribology in Machine Desing.* s.l. : Edit. Industrial Press Inc, 1991.
21. **Pérez, Francisco Martínez.** *La tribología: Ciencia y tecnología para el mantenimiento.* [ed.] Noriega editores. D.F. : Limusa, 1996. pág. 211.
22. **ASM 1992- Handbook Vol.18.** *Lubrication and wear technology.* [ed.] ASM International. 1992. Vol. 18.
23. **Sarkar.** *Desgaste de metales.* Primera Edición. México : Limusa, 1990.
24. *Rubbing and Scrubbing.* **Háhner,G and Spencer,N.** New York, USA : American Institute of Physicas, September de 1998, Physics Today, Vol. 51, pág. 22 a 27.
25. **Suh, N.** *Tribophysics.* New Jersey : Prentice-Hall, 1986. pág. 498.
26. **N., Carrillo C. Jose.** *Tesis Profecional.* Guadalajara : Facultad de Ingenieria CUCEI, U. de G.
27. **Theo Mang, Wilfried Dresel.** *Lubrican and Lubrication. 2.* s.l. : Wiley-VCH, 2007. pág. 890.
28. **Cecilio Angulo Bahón, Cristobal Raya Giner.** *Tecnologia de Sistemas de Control.* Catalunya : UPC, 2004.
29. **Kuo, Benjamin C.** *Sistemas de Control Automático.* s.l. : Pearson Educación, 1996.
30. **Ogata, Katsuhiko.** *Ineniería del Control Moderno.* Minnesota : Prentice Hall, 1993.
31. **Moreno, Emilio García.** *Automatización de los Procesos Industriales.* Valencia : CFP CERES-UPV, 1999.
32. **Charles E. Spurgeon, Josep Balcells, José Romeral.** *Automatas Programables.* Barcelona : MARCOMBO S.A., 1997.
33. *GrafcetTool - a GRAFCET Implementation in G2.* **Lindskog, Peter.** Linkoping : Linkoping University, 1993.

34. **Joan Domingo Peña, Antoni Grau Sales, Heminio Martínez García, Juan Gámilia Caro.** *Diseño y Aplicaciones con Autómatas Programables.* s.l. : Editorial UOC, 2003.
35. **Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp.** *IEC 61131-3: Prgraming industrial automation systems.* s.l. : Springer, 2001.
36. **Lewis, Robert W.** *Modelling Control Systems using IEC 61499: Applying Funtion Blocks to Distributed Systems.* s.l. : EIT, 2001.
37. **Oborne, David j.** *Ergonomia en Acción.* México : Trillas, 1990.
38. **P. Castells, F. Saiz, R. Moriyón, F. García.** *Modelización y diseño interactivo de interfaces con estructura dinamica .* Madrid : Univesidad Autonoma de madrid.
39. *Identificación y control de un cilindro neumático con valvulas proporcionales.* **Oscar Reinoso, Ernesto RubioRafael Puerto, José M. Azorin.** Cartagena : Universidad Miguel Hern´zndez.
40. *Introduction to Data Acquisition.* **Instrument, National.** s.l. : National Instrument, 2009.
41. **Ing. Ga, al Mahmoud Ali.** *APlicación de las redes neuronales en los sistemas de control vectorial de un motor de inducción.* Cataluña : Tesis doctoral UPC, 2000.
42. *Standar Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Grease (Four-Ball Method).* West Conshohocken : ASTM International, 2001. D 2266-01.
43. *Standar Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricanting Fluid (Four-Ball Method).* West Conshohocken : ASTM International, 1999. D 4172-94.
44. *Determination of shear stability of polymer-containing lubricating oils by the shell four-ball tester.* **661, Technical Coite.** Berlín : Deutsche Norm, 1996. DIN 51350.
45. *Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Grease (Four-Ball Method).* West Conshohocken : ASTM International, 2002. D 2596.
46. *Standar Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating FLuids (Four-Ball Method).* West Conshohocken : ASTM International, 2003. D 2783-03.
47. *Rediseño del sistema hidráulico utilizado para levantar hornos de galvanizado en una planta de clavos y alambre.* **Chiguil, Giovanni Luciano Velásquez.** San Carlos : Universidad San Carlos de Guatemala, 2006.
48. **Slavador, Antonio Gillen.** *Introducción a la neumática.* Barcelona : Marcombo, 1993.
49. **Millán, Slavador.** *Automatización neumpatica y electroneumática.* s.l. : Norgren, 1996.

50. **Frank P. Incropera, David P. DeWitt.** *Fundamentos de la transferencia de calor.* s.l. : Pearson, Prentice Hall, 1999.
51. *Horno eléctrico automatico para ceramicos .* **Sánchez, José Manuel Carranza.** Guadalajara : Expodime, 2002.
52. **Harper, Gilberto Enríquez.** *El ABC del control electrónico de las máquinas eléctricas.* México : Limusa, 2003.
53. *Representación grafica de los resultados obtenidos en la simulación del estado Tenso-Deformacional producido en el acoplamiento elastico de cuerpos geométricos.* **Diego García Cuervo, A.E. Alvarez Vigil,G. Morís Menéndez, J.E. Fernández.** Oviedo : X Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, 2009.
54. *Simulation, analyze and program support for pneumatic cylinder system .* **Djordje N. Dhovicni, Miroslav Medenica.** London : World congress on engineering 2009, 2009, Vol. 1.
55. **ExxonMobil.** *ExxonMobil 300 Marine Lubricants.* s.l. : ExxonMobil Corporation, 2003.
56. **Spencer&Hähner.** 1998.
57. **Dowson, D.** *History of Tribology.* New York : Longman, 1979.
58. **Sethuramiah, A.** *Lubricated wear Science and Technology.* New Dalhi, India : ITMMEC, Indian Institute of Technology, 2003.
59. **Kragelskii.** *Friction and Wear.* London : Butter worths, 1965.
60. **Spencer, Nicholas D. y Tysoe, Wilfred T.** 1995, Tribology Letters, Vol. 1, pág. 3.
61. **Bowden, F.P. y Tabor, D.** *The Friction And Lubrication Of Solids.* 1950. págs. 87-89.
62. **Rabinowicz, Ernest.** *Friction and wear of materials.* Estados Unidos de America : Wiley Interscience, 1995.
63. **Egor P, Popov.** *Introduccion a la Mecánica de Sólidos.* s.l. : Limusa, 1983. pág. Cap. 4 y 5 .
64. **Williams, John Austin.** *Engineering Tribology.* Great Britain : Oxford, 1994.
65. **HSMO.** *Deparment of Trade and Industry, Wear Resistant Surface in Engineering, A Guide to their Production, Properties and Selection.* UK : s.n., 1978.
66. **Rowe, C N.** *Some aspects of the heat of absorption in the function of a boundary lubricant, .* s.l. : ASLE, 1966.

67. **Stolarski, T A.** *A system for wear prediction in lubricated sliding contacts.* s.l. : Lub. Sci, 1996.
68. **Booser, E. Richard.** *CRC Handbook of Lubrication.* Florida : CRC Press, Inc, 1992.
69. Wikipedia. [En línea] 4 de Octubre de 2008. [Citado el: 7 de Octubre de 2008.] http://es.wikipedia.org/wiki/ASTM_International.
70. Wikipedia. [En línea] 25 de Septiembre de 2008. [Citado el: 7 de Octubre de 2008.] <http://es.wikipedia.org/wiki/DIN>.
71. **Marquez Morales, Agustin Leovigildo.** Diseño de una maquina tribologica para pruebas de desgaste abrasivo severo. *Tesis.* Mexico DF : IPN, 2002.
72. **Mondelo, Pedro R., y otros.** *Diseño de puestos de trabajo.* Barcelona, España : Alfaomega, 2007.
73. **Archad, J F.** *Apl, Phys.* 1953.
74. **Shu, N.** *Tribophysics Prentice Desing.* New Jersey, USA : s.n., 1986.
75. **Vite, Manuel.** Los pioneros de la tribología y su acontecimiento. México : Universidad de Guadalajara, 1996, pág. 6. Universidad de Guadalajara.
76. **Booser, E Richard.** *CRC Handbook of Lubrication.* New York : CRC Press, Inc., 2000.
77. **Milne, A A.** *Experiments on the friction and endurance of various surface treatments lubricated by molybdenum disulfide.* s.l. : Wear, 1957.
78. **Akao, Yoji.** "Development History of Quality Function Deployment". *The Customer Driven Approach to Quality planning and Deployment.* Minato, Tokyo : Asian Productivity Organization, 1996.
79. **Vishay.** *S-Beam Load Cell Model 6001 .* U.S. : s.n., 20 de Enero de 2006.
80. **Tortosa, L, y otros.** *Ergonomia y discapacidad.* Valencia : Instituto de Biomecánica de Valencia, 1999.
81. **Oborne, David J.** *Ergonomía en Acción: la adaptacion del medio de trabajo al hombre.* México : Trillas, 2007.
82. **McAtamney, L y Corlett, E N.** *RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders.* EU : Applied Ergonomics, 1993.
83. **Mondelo, Pedro R, y otros.** *Ergonomia 3 Diseño de puestos de trabajo .* México : Alfaomega, 2007.

84. **Krick, E V.** *Introducción a la ingeniería y al diseño en ingeniería.* 2°. Mexico D.F. : Limusa, 1984.
85. **Ramos Watanave, Jorge.** *Apuntes del curso de diseño mecánico.* México D.F. : SEPI ESIME Zacatenco IPN, 2003.
86. **Riba Romeva, Carles.** *Diseño concurrente.* Barcelona España : Ediciones UPC, 2002.
87. *Survey of possible wear mechanisms.* **Burwell.** 1957, Wear.
88. **D2266, ASTM.** *Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Grease (Foru Ball Method).* United States : s.n., 2001.
89. **D2596, ASTM.** *Standard Test Method For Measurement Of Extreme-Pressure Properties Of Lubricating Grease (Four Ball Method).* United States : s.n., 2002.
90. **D2783, ASTM.** *Standard Test Method For Measurement Of Extreme-Pressure Properties Of Lubricating Fluids (Four Ball Method).* United States : s.n., 2003.
91. **D4172, ASTM.** *Standard Test Method For Wear Preventive Characteristics Of Lubricating Fluid (Foru Ball Method).* United States : s.n., 1999.
92. **John, D Morgan, y otros.** *Máquina Tribológica de Cuatro Bolas.* 490274 Estados Unidos, 10 de Junio de 1943.
93. **51350-6, DIN.** *Determination of shear stability of polymer-containing lubricating oils by the shell four-ball tester.* Berlin : DIN Destches Institut für Normung e. V. , august 1996. 105.
94. **Palmexico, Grupo.** Acero maquinaria 1018 . [En línea] Mayo de 2008. [Citado el: 22 de Junio de 2009.] <http://www.acerospalmexico.com.mx/1018.htm>.
95. **SIEMENS.** *Catalogo General SD03 .* México : SIEMENS, 2005.
96. **Martin.** *Stock Drive Selection.* Estados Unidos : Martin, 2005.
97. **Design, Internacional Council of Societies of Industrial.** International Council of Societies of Industries Desing A Partner of the International Desing Alliance. [En línea] [Citado el: 5 de feb de 2009.] <http://www.icsid.org/about/about/articles32.htm>.
98. **Merian And Kraige.** *Engineering Mechanics.* Segunda Edición. s.l. : Statics. Jonhn Wiley and Sons, 1987. pág. 454. Vol. 1.
99. **Hutchings, I.M.** *Triology: Fricction and Wear of Engineering Materials.* s.l. : Edward Arnold, 1992. pág. 272.
100. *Survey of Possible Wear.* **Burwell.** 1975, Wear, págs. 119-141.

101. **Bushan and Gupta.** *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments.* s.l. : Ed. McGraw-Hill, 1991.
102. **Krangel'skii, I.V.** *Friction and Wear.* London : Ed. Butter Worths, 1965.
103. **Artobolevski.** *Mecanismos de la técnica moderna.* Moscú : s.n., 1976. pág. 589. Vol. 1.
104. **Avner.** *Introducción a la Metalurgia Física.* 2da. México : McGraw-Hill, 1985. pág. 695.
105. *Grafsettool- a GRAFCET implementation in G2.* **Lindskog, Peter.** Lin:Ñ[*] : s.n.
106. **Pedro L. Mondelo, Enrique Gregori Torada, Oscar de Pedro Gonzáles, Migue A. Gómez Fernández.** *Ergonomia 4. Trabajo en oficinas.* Ciudad de México : AlfaOmega, 2002.
107. **Firestone, Industrial Products Company.** *Engineering Manual and Design Guide.* Indiana USA : Firestone Company.

Anexo.

Anexo A

Definición de usuario y material

	Definición de usuario	
u0	Nombre	DU1
u1	Fecha	DU2
	Definición de material	
m0	Nombre	DM1
m1	Densidad	DM2

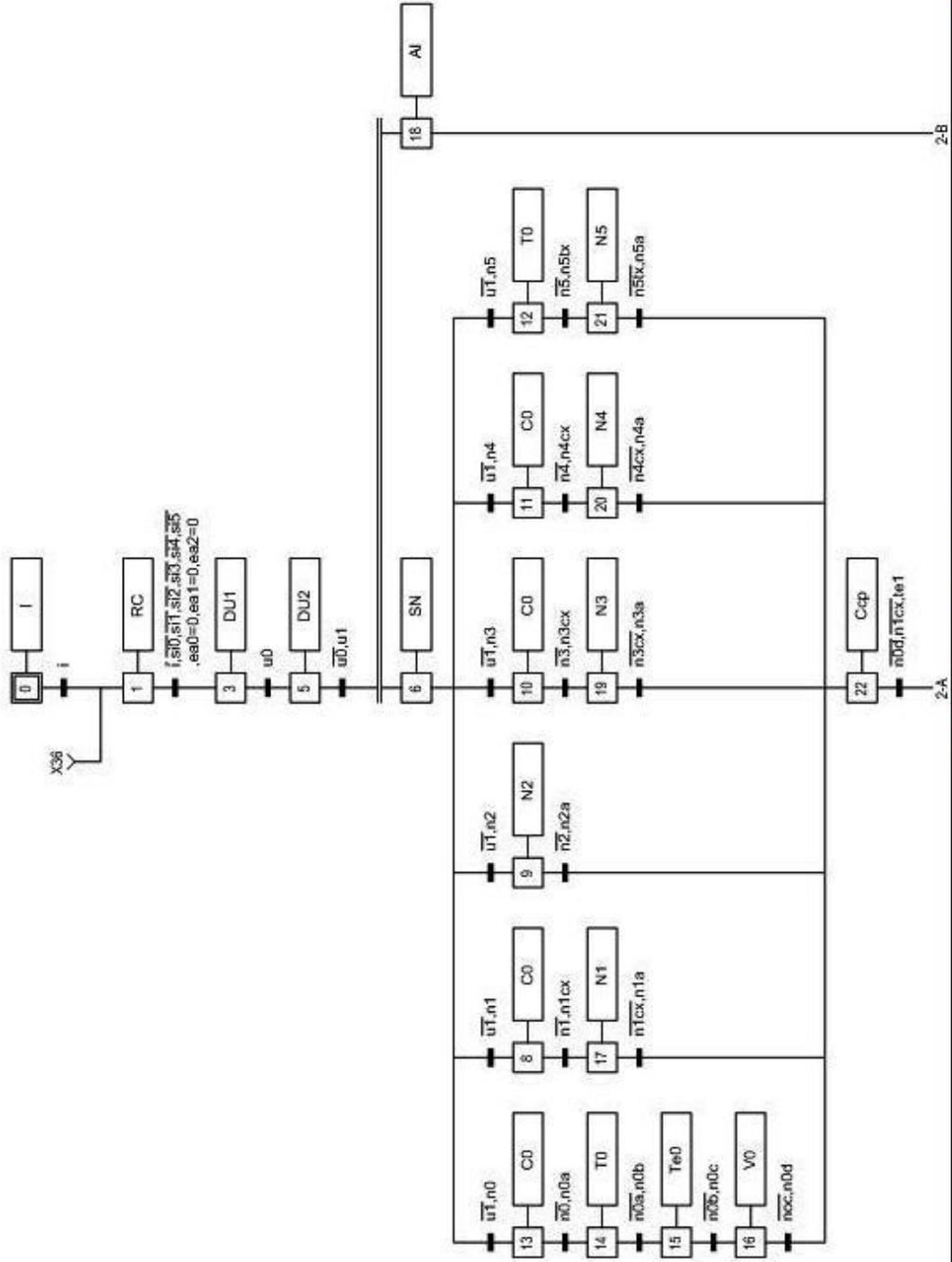
Puerto de salidas digitales

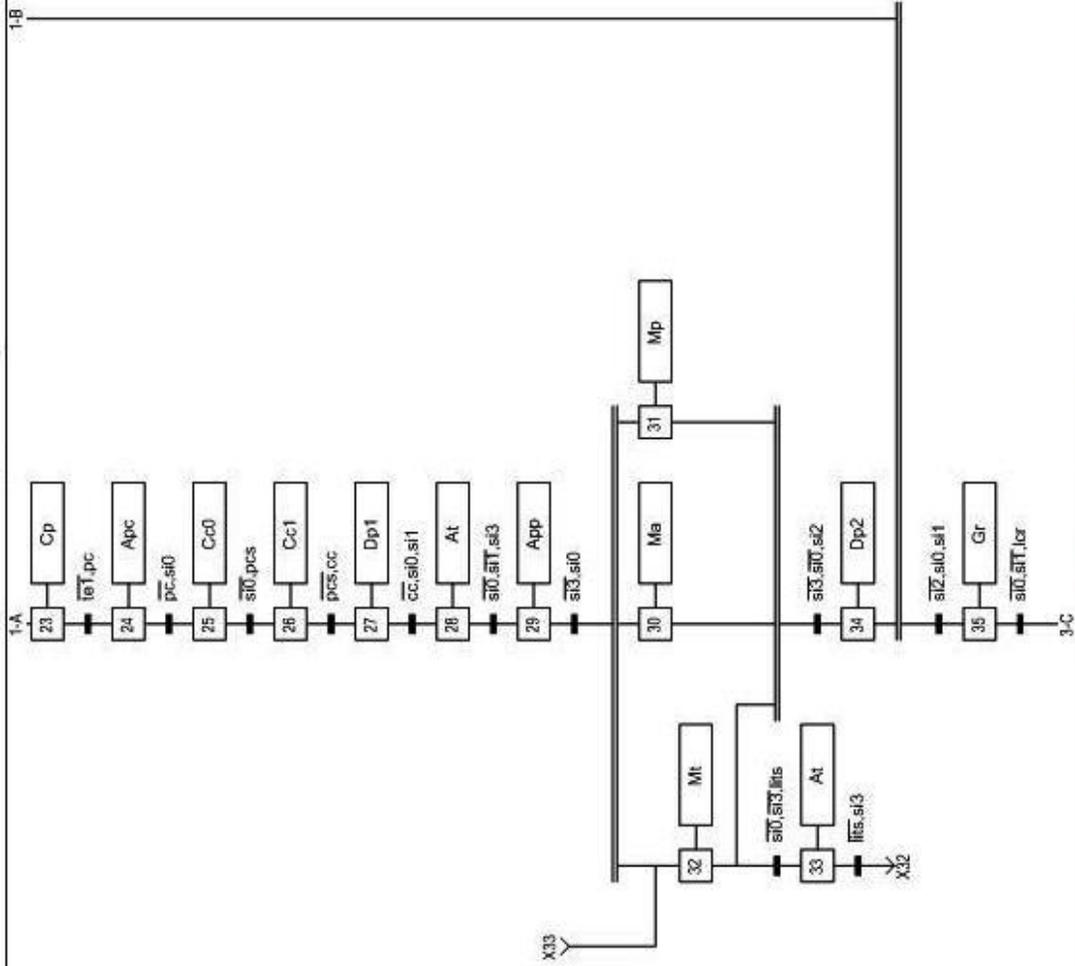
	Tarjeta salidas digitales	
0	si0	Válvula reguladora
1	si1	
2	si2	Motor
3	si3	Resistencia
4	si4	Válvula 3-2
5	si5	Válvula 2-2

Secuencia de actividades

Símbolo	Preparación de prueba	Variable
Ccp	Colocación del contenedor	
	Temperatura detectada	te1
Cp	Confinación de posición	
	Contenedor colocado	pc
Apc	Aplicación de presión de cierre	
	Presión aplicada	s10
Cc0	Cierre de contenedor	
	Par de cierre superado	pcs
Cc1	Confirmación de cierre	
	Confinación de cierre	cc
Dp1	Desfogue de presión	
	Tiempo de desfogue cumplido	si0,si1
At	Adecuación de temperatura	

	Temperatura de prueba cumplida	si3
App	Aplicación de presión de prueba	
	Presión aplicada	si0
	Prueba	
Ma	Motor activo	
	Tiempo de prueba cumplido	si2
Mp	Monitoreo de par	
	Par limite superado	pls
Mt	Monitoreo de temperatura	
	Límite inferior de temperatura superado	lits
At	Adecuación de temperatura	
	Temperatura de prueba cumplida	si3
	Fin de prueba	
Dp2	Desfogue de presión	
	Tiempo de desfogue cumplido	si0,si1
Gr	Generación de reporte	
	localización y creación de reporte	lcr
Cp	Continuación de prueba	
	Fin de prueba	fp
	Nueva prueba	np

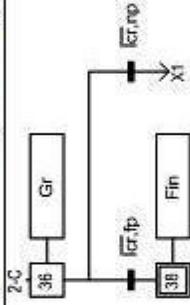




IPN

Máquina de ensayos tribológicos

ESIME-UZ



IPN

Máquina de ensayos tribológicos

ESIME-UZ

Reporte de pruebas

Las pruebas realizadas los días 10 y 11 de Octubre del año 2009, cuentan con las siguientes características (55):

Material

Mobil 300- Aceite para camión a diesel

Especificaciones y Aprobaciones

Mobil Delvac MX 15W-40 cumple las siguientes especificaciones:	
ACEA E7	X
API CI-4/CH-4/CG-4/CF/SL/SJ	X
Cummins CES 20072/1	X
Detroit Diesel 7SE 270 (4 stroke cycle)	X
Caterpillar CAT ECF-2	X

Mobil Delvac MX 15W-40 posee las siguientes aprobaciones:	
Daimler Chrysler MB 228.3	X
Cummins CES 20078/7/6/5	X
Mack EO-M Plus	X
Volvo VDS-2/VDS-3	X
MAN M3275	X
Renault RLD	X
MTU Type 1 (Open crankcase only - 500 hr ODI)	X

Mobil Delvac MX 15W-40 está recomendado en las aplicaciones que requieren:	
Allison C-4	X
ACEA B4, B3, A2	X
Mack EO-M	X

Características típicas

Mobil Delvac MX 15W-40	
Grado SAE	15W-40
Viscosidad, ASTM D 445	
cSt @ 40°C	104
cSt @ 100°C	14.3
Índice de viscosidad, ASTM D 2270	140
Cenizas sulfatadas, % peso, ASTM D 874	1.1
TBN, mg KOH/g, ASTM D 2896	10
Punto de congelación, °C, ASTM D 97	-30
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	215
Densidad @ 15°C kg/l, ASTM D 4052	0.88

Equipo

Máquina de ensayos tribológicos, basada en la técnica de cuatro bolas de acero lubricadas.

Consumibles:

- 4 bolas de acero AISI E-52100 por prueba
- Quita grasa
- Estopa
- 16 ml de aceite por prueba

Resultado de pruebas

a)

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 13:54:55
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,88000
1. Prueba: ASTM D4172
2. Carga: 40,000000 Kgf
3. Velocidad: 1200,000000 rpm
4. Temperatura: 75,000000 °C
5. Tiempo: 3600,000000 seg

Valores promedio

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
42,90553	0,154189	75,10219

Gráficas de comportamiento

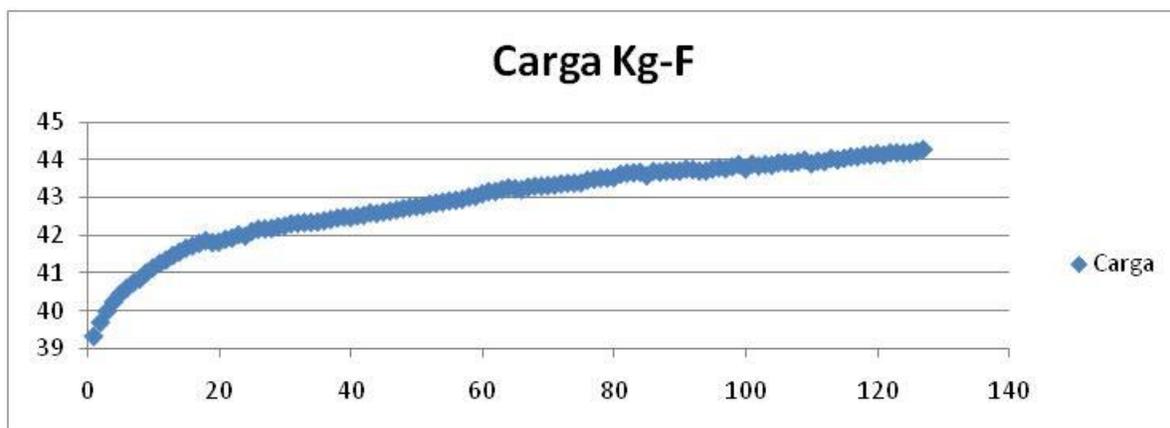


Fig. 128 Carga

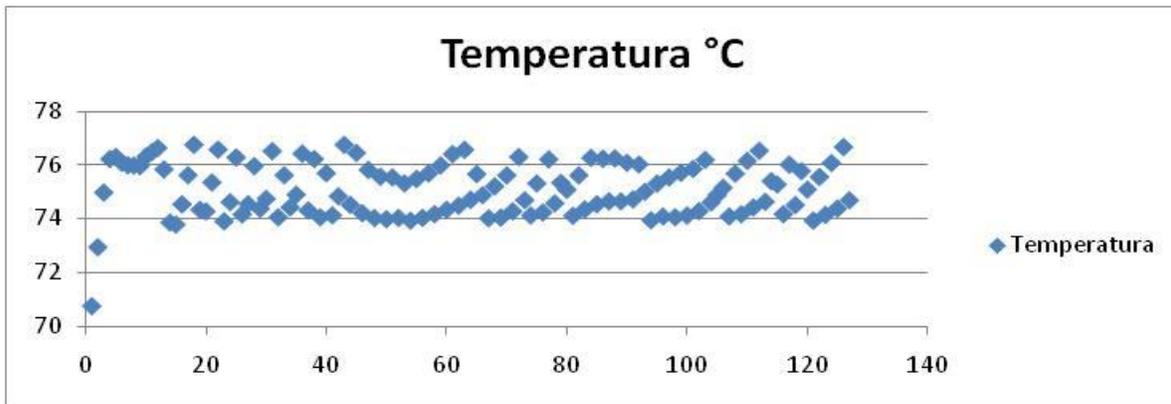


Fig. 129 Temperatura

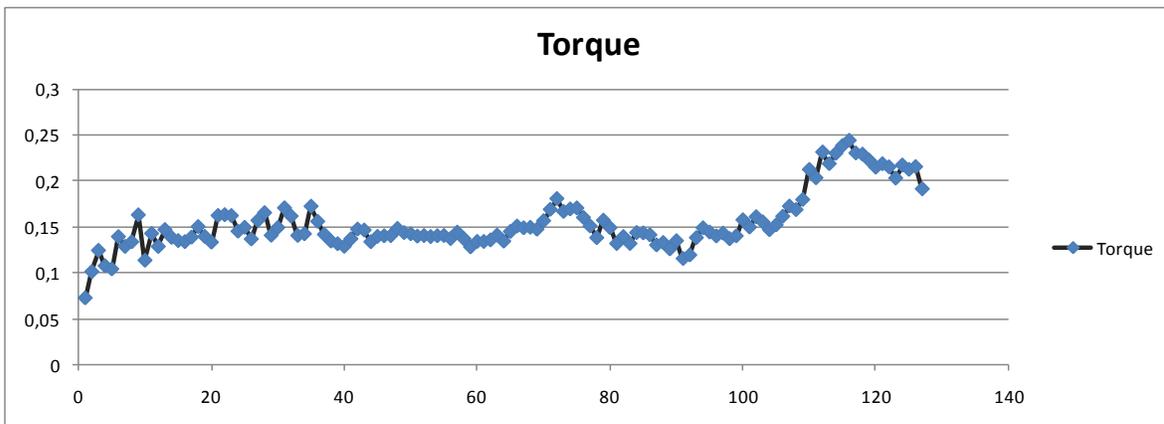


Fig. 130 Par

b)

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 15:26:34
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,880000

1. Prueba: ASTM D4172
2. Carga: 40,000000 Kgf
3. Velocidad: 1200,000000 rpm
4. Temperatura: 75,000000 °C
5. Tiempo: 3600,000000 seg

Valores promedio

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
45,50001	0,120982	74,95346

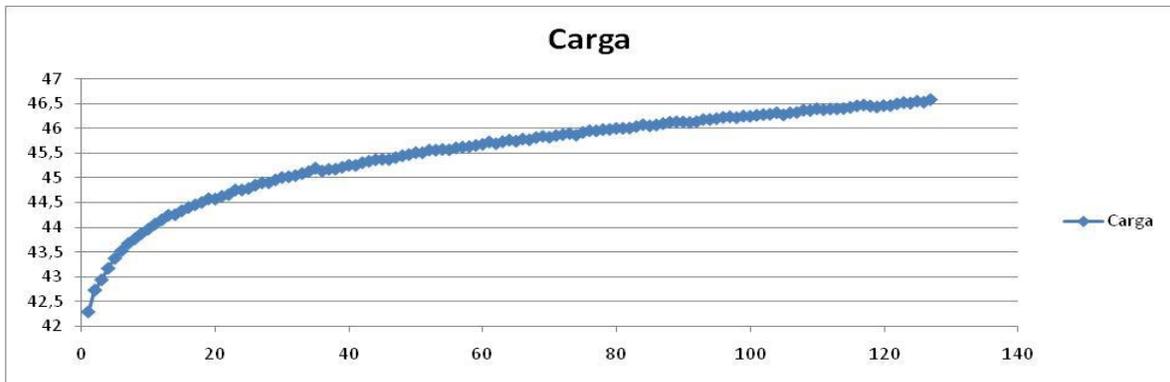


Fig. 131 Carga

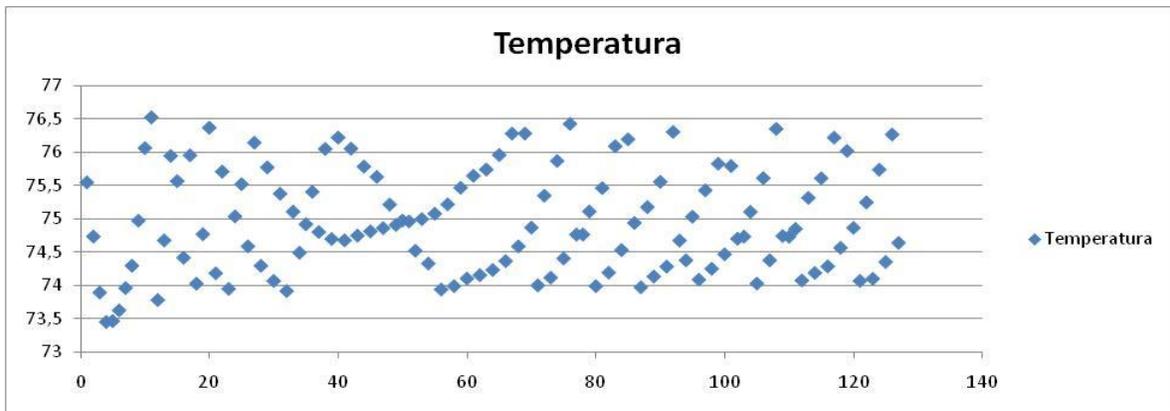


Fig. 132 Temperatura

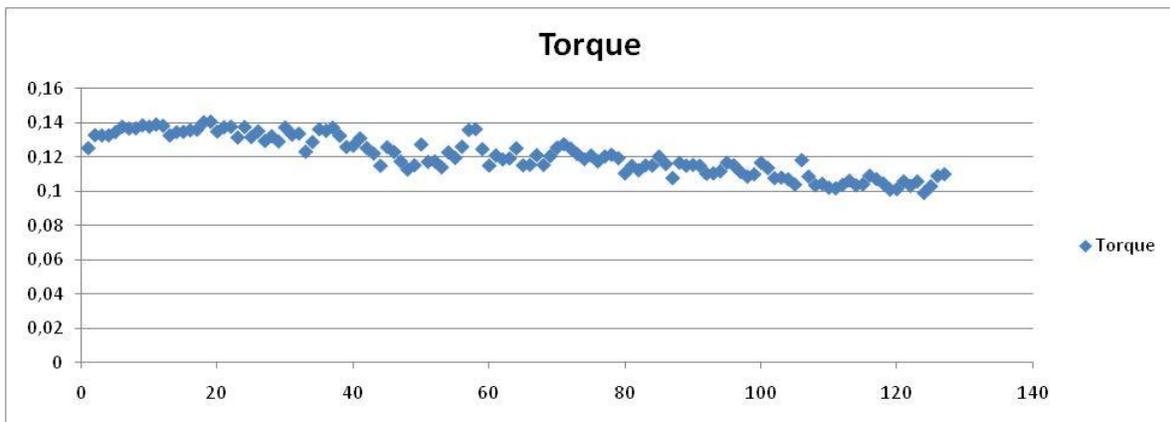


Fig. 133 Par

c)

1. Nombre de usuario: Ernesto Garcia
2. Fecha de operación : 10/10/2009 17:00:29
3. Nombre del material lubricante: Movil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 50,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
53,307620	0,128954	35,157703
52,772798	0,124482	35,167573
52,363687	0,126164	35,163918
52,023656	0,125173	35,173787
51,771989	0,123713	35,184753
51,559135	0,127911	35,199740
51,375327	0,126320	35,222036
51,211781	0,125629	35,246160
51,068494	0,126868	35,267359
50,956697	0,126659	35,289655
50,850757	0,124717	35,322183
50,749212	0,124508	35,367137
50,668659	0,127142	35,404048
50,604949	0,122565	35,436208
50,518782	0,123100	35,483349
50,467033	0,124782	35,517333
50,408205	0,120975	35,561913

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 17:19:39
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 126,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
127,643778	0,236991	30,425563
126,649072	0,227304	30,430704

125,875765	0,231828	30,443922
125,263319	0,339213	30,448328
124,546398	1,056710	30,467420
123,489446	1,524193	30,500096
122,826716	1,051169	30,530569
122,473504	0,531232	30,610968
122,162032	0,349827	30,740915
121,894743	0,347467	30,949751
121,667486	0,346072	31,202208
121,478065	0,348914	31,489085
121,285959	0,352187	31,802652
121,125585	0,356372	32,114293
120,988401	0,359475	32,421079
120,855367	0,361770	32,731805
120,759436	0,358054	33,024860

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 17:36:34
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 200,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
201,772696	1,842320	27,518724
198,725112	3,286231	27,530874
197,340822	1,108981	27,580576
196,467190	0,700067	27,656782
195,760277	0,619268	27,872118
195,135626	0,554688	28,206998
194,596410	0,514190	28,633356
194,123833	0,504516	29,115056
193,708375	0,506106	29,620053
193,335147	0,508558	30,128849
192,997801	0,515390	30,645108
192,694874	0,520449	31,130660
192,442719	0,521036	31,587016
192,200084	0,516681	32,026676

191,973315	0,519288	32,426576
191,788532	0,527607	32,817166
191,597402	0,525755	33,197725

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 18:27:16
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 250,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
251,316872	3,118634	26,511274
249,434131	5,499585	26,560287
247,468885	7,652843	26,741948
244,566052	9,717740	27,099652

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 18:47:19
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 250,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
249,405327	3,945641	26,293083
247,867988	6,109096	26,363484

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 17:55:07
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 315,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C

5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
320,701957	0,024529	27,103335
316,237374	5,320853	27,110333
313,297926	8,493671	27,251391
311,577023	8,244375	27,683288
307,338721	10,132170	30,104608
307,838881	3,978290	45,512802
305,566557	2,751482	51,158190
303,241996	3,336299	49,824699
301,501077	6,684629	51,049937
302,172107	5,786575	53,439158
301,629229	3,586339	56,774380
299,704504	3,451325	61,392517
299,838514	2,889456	66,456686
297,562041	2,098761	72,062956
297,020872	2,278771	90,346670
296,736008	1,273697	98,989956
295,838453	1,085395	89,312741
295,640488	1,188360	85,007737

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 10/10/2009 19:09:47
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 200,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par Kgm	Temperatura °C
204,889116	2,005405	27,395744
201,750727	3,245082	27,377333
200,425998	1,693316	27,382120
199,614611	1,433979	27,448031
198,914777	1,089437	27,640585
198,340655	0,928919	27,982898
197,826093	0,807413	28,499839
197,363036	0,678150	29,153656
196,949043	0,633975	29,879441
196,609012	0,626335	30,680348

196,292903	0,626934	31,881854
196,002424	0,632606	32,692603
195,773459	0,637665	33,288541
195,516666	0,639164	33,836933
195,308449	0,641238	34,374070
195,114878	0,640925	34,965048
194,936441	0,640195	35,522084

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 11/10/2009 11:14:55
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: No Normalizada
2. Carga: 225,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 10,000000 seg

Carga KgF	Par N-m	Temperatura °C
225,288769	2,441935	25,541607
221,923367	5,697470	25,550459

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 11/10/2009 11:39:55
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 250,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par N-m	Temperatura °C
254,679345	0,028675	25,312520
251,557798	3,127513	25,309937
248,470182	7,017907	25,357898

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 11/10/2009 11:59:10
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 250,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm

4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par N-m	Temperatura °C
252,580088	0,028779	26,849161
249,043084	3,757508	26,824478
246,266938	5,966859	26,891528

1. Nombre de usuario: Ernesto García
2. Fecha de operación : 11/10/2009 12:21:44
3. Nombre del material lubricante: Mobil 300
4. Densidad del lubricante: 0,500000

1. Prueba: ASTM D2783
2. Carga: 250,000000 Kgf
3. Velocidad: 1770,000000 rpm
4. Temperatura: 25,000000 °C
5. Tiempo: 9,960000 seg

Carga KgF	Par N-m	Temperatura °C
254,152578	0,028949	25,549722
250,133233	5,287226	25,551197

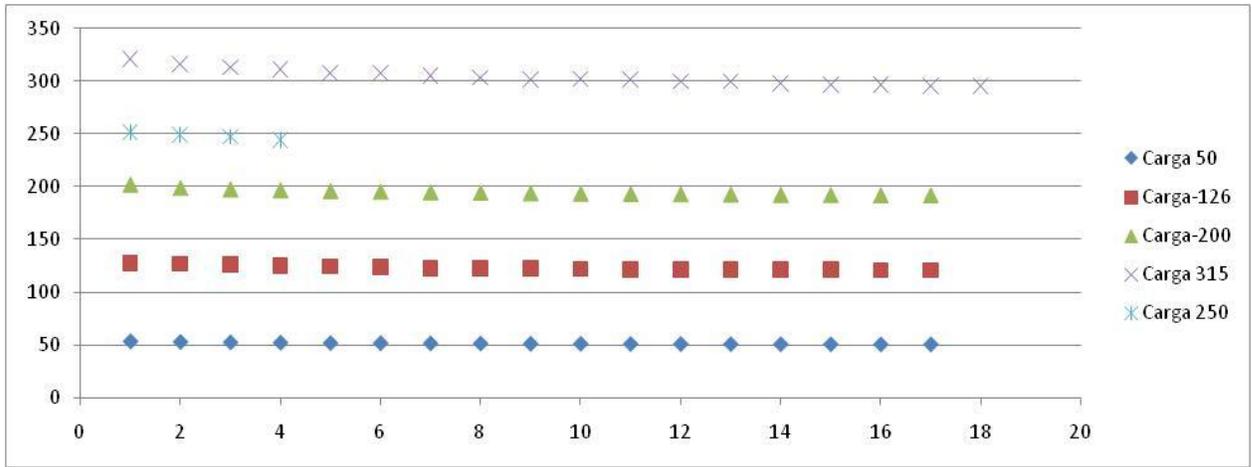


Fig. 134 Carga

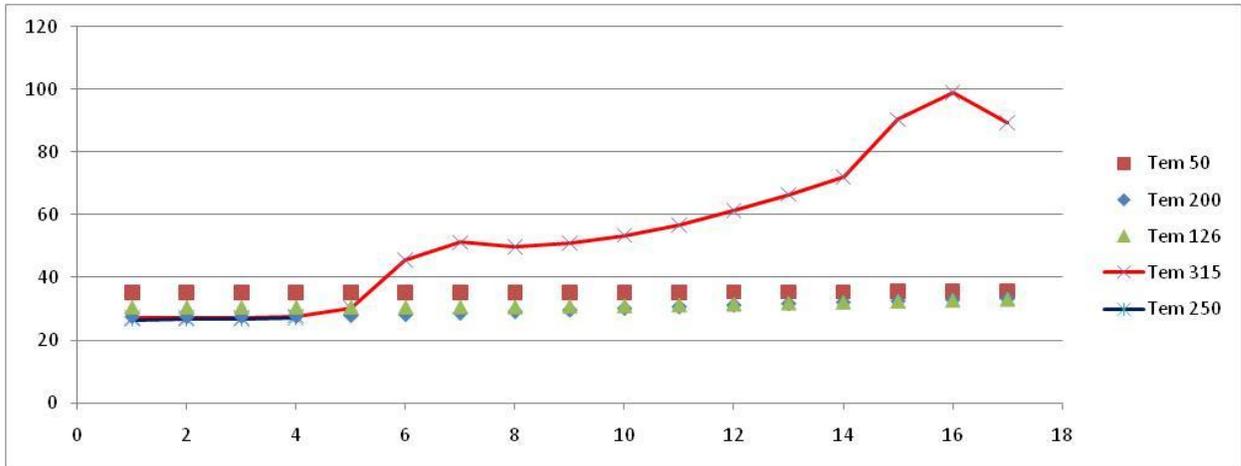


Fig. 135 Temperatura

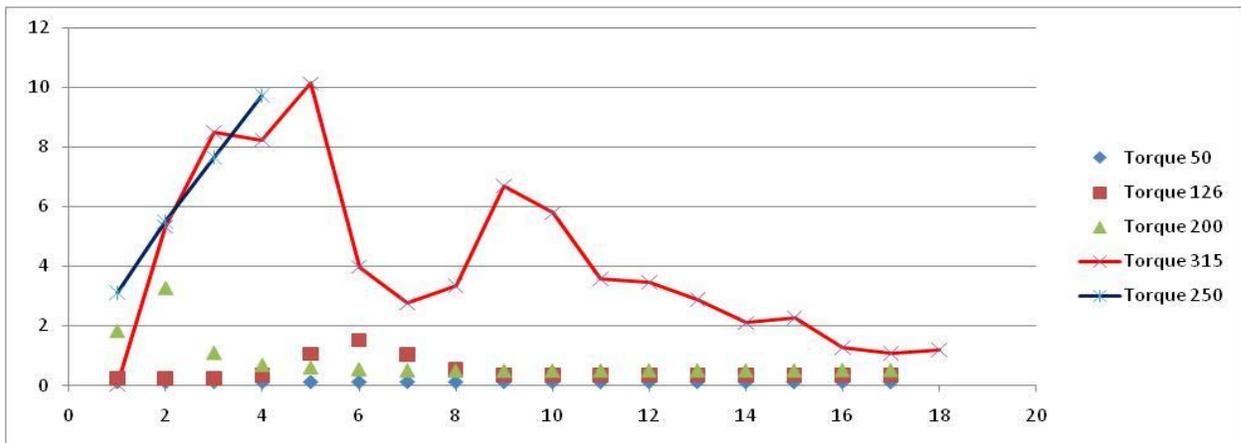


Fig. 136 Par

Imágenes

Pruebas de no extrema presión: Las pruebas de no extrema presión se utilizan para medir el diámetro de la huella de desgaste dejado en las probetas que forman la base del arreglo tetraédrico, como se muestra en la Fig. 137.

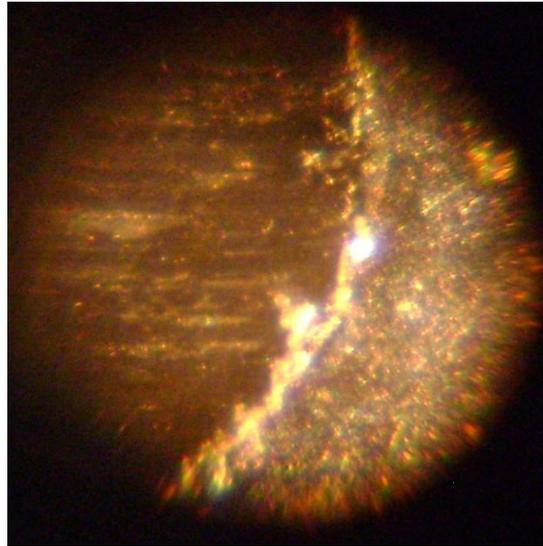


Fig. 137 Marca de desgaste en una prueba de no extrema presión (ASTM 4172)

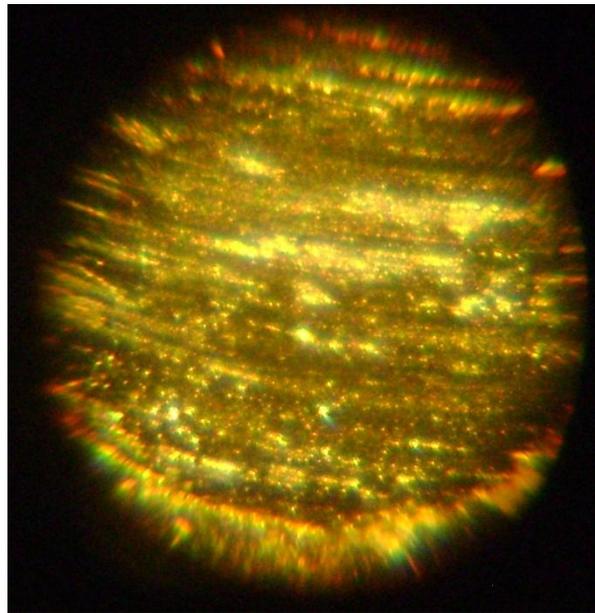


Fig. 138 Marca de desgaste generada por un ensayo de no extrema presión (ASTM D2266)

Pruebas de extrema presión: Esta prueba tiene como objetivo el verificar las condiciones en las cuales se logra la soldadura del arreglo tetraédrico o un marcaje significativo en cada una de las probetas.



Fig. 139 Marca de desgaste generado por una prueba de extrema presión (ASTM D2783)



Fig. 140 Marca de desgaste generada por una prueba de extrema presión (ASTM D 2596)