



**Sistema de adquisición de datos con interface HMI, para el banco de pruebas de
balanceo de masas recíprocantes**

Acosta López, Sebastián Andreé

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Echeverría Yáñez Luis Manuel

28 de junio del 2023

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO
TESIS

NOMBRE DEL ALUMNO
SEBASTIAN ANDREE ACOSTA LOPEZ

NOMBRE DEL ARCHIVO
SEBASTIAN ANDREE ACOSTA LOPEZ - TESIS

SE HA CREADO EL INFORME
28 jun 2023

Resumen

Fragmentos marcados	6	0,3 %
Fragmentos citados o entrecuillados	8	0,4 %

Coincidencias de la Web

scribd.com	3	0,1 %
docplayer.net	3	0,1 %
espe.edu.ec	1	0,1 %
omega.com	2	0,1 %
edibon.com	2	0,1 %
tme.eu	1	0,1 %
uvg.edu.gt	1	0,1 %
hellowordroom.com	1	0 %

1 de 14 fragmentos

Fragmento del alumno **CITADO**

Nota. Tomado de Equipo MBMRC. **Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes, Controlado desde Computador (PC)**, por Edibon

Mejor coincidencia en la Web

Equipo de Balanceo de masas Reciprocantes, Controlado desde Computador (PC) EDIBON @ 0 Carrito

Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes, Controlado ... - Edibon <https://www.edibon.com/es/equipo-de-balanceo-de-masas-reciprocantes-controlado-desde-computador-pc>

2 de 14 fragmentos

Fragmento del alumno **MARCADO**

Diseño y Construcción de un Prototipo de Motor Reciprocante didáctico para Analizar Fuerzas y Momentos de Sacudimiento en Motores de 4 Cilindros en V, Variando el ángulo de la V

Mejor coincidencia en la Web

Diseño y construcción de un prototipo de motor reciprocante didáctico para analizar fuerzas y momentos de sacudimiento en motores de 4 cilindros en V, variando el ángulo de la V.

Diseño y construcción de un prototipo de motor reciprocante ... <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/1018>

LUIS MANUEL
ECHEVERRIA YANEZ

Firmado digitalmente por LUIS
MANUEL ECHEVERRIA YANEZ
Fecha: 2023.07.12 07:45:19
+05'00'



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación "Sistema de Adquisición de datos con interface HMI, para el banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes" fue realizado por el señor **Acosta López Sebastián Andréé**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de junio del 2023

LUIS MANUEL
ECHEVERRIA YANEZ

Firmado digitalmente por LUIS
MANUEL ECHEVERRIA YANEZ
Fecha: 2023.07.17 07:41:49
-05'00'

Ing. Echeverría Yáñez, Luis Manuel

C.I.: 1708316565



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Acosta López Sebastián Andreé**; con cédula de ciudadanía N.: 0604407304, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación "Sistema de adquisición de datos con interface HMI, para el banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 28 de junio del 2023

Acosta López Sebastián Andreé

C.I.: 0604407304



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo, **Acosta López Sebastián Andreé**; con cédula de ciudadanía N.: 0604407304, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**Sistema de adquisición de datos con interface HMI, para el banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes**", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangoquí, 28 de junio del 2023

Acosta López Sebastián Andreé

C.I.: 0604407304

Dedicatoria

Dedico este proyecto a Dios quien me ha guiado y cuidado siempre, a mi madre Libia y a mi hermana Sofía por ser la razón para salir adelante y quienes me entregan su amor diariamente, a mi padre Bolívar por apoyarme siempre y ser ejemplo de orden y disciplina, y a mis tíos y tías que han creído en mí y apoyado durante toda mi vida; sin el cariño y motivación de estas personas este logro no sería posible.

Sebastián Andreé Acosta López

Agradecimiento

Mi agradecimiento eterno con Dios por darme la capacidad necesaria para conseguir este logro, y encaminarme por el camino correcto. A mi madre Libia por entregar su vida al cuidado y formación de sus hijos y nunca desfallecer antes las adversidades, educándonos con valores y principios que son las principales cualidades de un buen profesional. A mi hermana Sofía por ser un ejemplo para mí, por su apoyo incondicional y nunca dudar de mis capacidades, y toda la felicidad que trae a mi vida.

Agradezco especialmente a mis tías Carmen, y Sonia que han sido el principal apoyo durante toda mi vida y como ejemplo de perseverancia y superación, me impulsan a salir a delante día a día con humildad y manteniendo mi esencia.

Agradezco a toda mi familia, tíos y primos que siempre están para apoyarme en lo que sea necesario demostrando el cariño y solidaridad que nos permite mantenernos como una familia unida, y me motiva a seguir su ejemplo de ser buenos profesionales.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE institución que me ha formado como profesional y obtener el título de Ingeniero en Mecatrónica, a todos los profesores que han transmitido sus conocimientos y consejos profesionales, especialmente al Ing. Luis Echeverría por ser guía y consejero para el desarrollo de este trabajo de titulación.

Agradezco a mis amigos de la Universidad Mateo, Víctor, Alessandro, David, Carlos, Diego, Santiago, Andrés y Eloy cuyo lazo de amistad sincero y desinteresado hicieron de esta etapa de mi vida llena de alegría, con anécdotas y memorias que las llevaré siempre en memoria.

Índice de Contenido

Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen	21
Abstract.....	22
Capítulo I: Generalidades	23
Antecedentes	23
Equipos de laboratorio de fabricación en serie.....	23
Equipos Nacionales realizados como Proyectos.....	28
Esto del equipo previo al proyecto	31
Análisis Comparativo	33
Justificación e Importancia	35
Alcance del Proyecto.....	35
Objetivos	42
Objetivo General.....	42
Objetivos Específicos.....	42
Estructura del Documento	43
Capítulo II: Investigación Bibliográfica.....	44

Centroides y centros de masa	44
Momentos de inercia	47
Fuerzas y Momentos de Sacudimiento.....	49
Balaceo	50
Balanceo Estático	51
Balanceo Dinámico	53
Mecanismo Biela Manivela	54
Análisis de Fuerzas en el Mecanismo biela-manivela.....	58
Motores Multicilíndricos	59
Capítulo III: Metodología de diseño y estudio mecánico del sistema.....	61
Metodología de Diseño.....	61
Procedimiento del modelo “V”	61
Identificación de Requerimientos	63
Modelado CAD y descripción de componentes mecánicos del bastidor	65
Características de motor Eléctrico y control analógico.....	67
Controlador de velocidad analógico del motor	68
Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración Mono cilindro.....	68
Modelo Dinámicamente equivalente del mecanismo biela-manivela.....	73
Balanceo del sistema biela manivela del motor mono cilindro.....	77
Fuerzas Transmitidas.....	78
Torque de sacudimiento.....	80

	10
Momentos Transmitidos.....	81
Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración de Cuatro cilindros en línea.....	82
Diagrama de fase de la manivela.....	86
Fuerzas de Sacudimiento en motores en línea.....	86
Momentos de Sacudimiento en motores en línea.....	87
Momentos y fuerzas transmitidas.....	89
Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración de Cuatro cilindros en V.....	90
Fuerzas de Sacudimiento en motores en línea.....	94
Momentos de Sacudimiento en motores en V.....	97
Momentos y fuerzas transmitidas.....	99
Capitulo IV: Diseño del sistema de control y adquisición de Datos.....	102
Selección de sensores para medir vibraciones.....	102
Galgas Extensiométricas.....	102
Acelerómetros.....	103
Giroscopios.....	104
Selección del Circuito de Acondicionamiento de Galgas Extensiométricas.....	106
Transmisor para celdas de carga JY-S60.....	106
Transmisor para celdas de carga Omega TXDIN1600S.....	107
Transmisor de peso WT95.....	109
Selección del Encoder de velocidad angular.....	111
Encoder Omron E6B2-CWZ3E.....	111

	11
Encoder Omron E40S6-1000-3T-24.....	112
Encoder Serie 28 eje semi hueco Hohner	114
Descripción del PLC Xinje XC3-32RT-E	116
Selección del módulo analógico	117
XD-E2WT-C.....	117
XC-E4AD-H	118
XC-2AD2DA-BD.....	119
Descripción de la HMI Xinje Touch Win TG865.....	120
Medición de fuerzas y momentos de sacudimiento mediante las galgas extensiométricas..	123
Análisis mecánico de la barra en voladizo.....	123
Selección de galgas extensiométricas	130
Programación del PLC	132
Identificación de las interfaces externas al sistema de control	134
Definición de las principales señales intercambiadas entre el sistema de control y la planta	135
Definición de todas las interacciones con el operador.....	136
Análisis del sistema de control descompuesto en particiones lógicas	137
Definición de las Unidades de Organización de Programa requeridos	138
Conversión de Datos	141
Definición de los requerimientos del ciclo de escaneo del programa.....	145
Configuración del sistema mediante definición de recursos, conexión entre programas y salidas / entradas físicas y asignación de bloques de función a las tareas.....	146

Diseño y programación de la Interfaz Humano Máquina	148
Arquitectura de la Interfaz	149
Navegación	150
Distribución	151
Resultados	154
Diseño del tablero eléctrico de control	158
Elementos de protección	158
Elementos de alimentación de potencia	160
Elementos de maniobra y control	163
Cableado	165
Diseño de mesa de soporte	170
Construcción y Montaje del Sistema	171
Construcción del Tablero Eléctrico y soporte de HMI	171
Proceso de ensamble y montaje del tablero eléctrico	171
Montaje de Galgas Extensiométricas	174
Montaje de Encoder	179
Presupuesto final del proyecto	180
Capítulo V: Integración, pruebas y resultados	182
Integración del sistema	182
Arquitectura de la Comunicación	182
Calibración y verificación de Celdas de Carga	183

Secuencia de Activación	184
Análisis de Resultados.....	185
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones	198
Conclusiones.....	198
Recomendaciones.....	199
Trabajos Futuros	200
Bibliografía.....	201
Apéndices	203

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Características de la DAQ PCI Express</i>	26
Tabla 2	<i>Comparativa entre equipos y trabajos revisados y el proyecto desarrollado</i>	34
Tabla 3	<i>Explicación de requerimientos con la investigación previa</i>	64
Tabla 4	<i>Características motor eléctrico</i>	67
Tabla 5	<i>Características del prototipo en configuración Biela Manivela</i>	70
Tabla 6	<i>Características del prototipo de motor de 4 cilindros en línea</i>	83
Tabla 7	<i>Características del prototipo de motor de 4 cilindros en V</i>	91
Tabla 8	<i>Matriz de selección de sensor de vibraciones</i>	105
Tabla 9	<i>Características transmisor para celdas de carga JY-S60</i>	107
Tabla 10	<i>Características transmisor de celda de carga TXDIN1600S</i>	108
Tabla 11	<i>Características transmisor de peso WT65</i>	109
Tabla 12	<i>Matriz de selección de módulo para galgas extensiométricas</i>	110
Tabla 13	<i>Características encoder Omron E6B2-CWZ3E</i>	112
Tabla 14	<i>Características encoder Omron E6B2-CWZ3E</i>	113
Tabla 15	<i>Características encoder Serie 28 eje semi hueco Hohner</i>	114
Tabla 16	<i>Matriz de selección de Encoder incremental</i>	115
Tabla 17	<i>Características PLC Xinje XC3-32RT-E</i>	116
Tabla 18	<i>Características módulo XD-E2WT-C</i>	118
Tabla 19	<i>Características módulo XC-E4AD-H</i>	118
Tabla 20	<i>Características módulo XC-2AD-2DA-BD</i>	119
Tabla 21	<i>Matriz de selección del módulo analógico</i>	120
Tabla 22	<i>Características Touchwin TG865</i>	121
Tabla 23	<i>Características galgas extensiométricas de flexión</i>	131
Tabla 24	<i>Características galgas extensiométricas de torsión</i>	132
Tabla 25	<i>Definición de entradas booleanas y analógicas</i>	147

Tabla 26	<i>Definición de salidas digitales.....</i>	147
Tabla 27	<i>Definición de entradas virtuales.....</i>	147
Tabla 28	<i>Definición de salidas virtuales</i>	148
Tabla 29	<i>Identificación de Memorias Auxiliares.....</i>	148
Tabla 30	<i>Fusibles elegidos.....</i>	159
Tabla 31	<i>Disyuntores monofásicos</i>	160
Tabla 32	<i>Consumo de corriente de los elementos del sistema de control a 24 VDC.....</i>	161
Tabla 33	<i>Fuente de poder 24 V DC.....</i>	162
Tabla 34	<i>Regulador de voltaje</i>	162
Tabla 35	<i>Relés.....</i>	163
Tabla 36	<i>Luces indicadoras</i>	164
Tabla 37	<i>Pulsador de emergencia.....</i>	164
Tabla 38	<i>Conductores del tablero de control.....</i>	169
Tabla 39	<i>Presupuesto final del Proyecto.....</i>	181
Tabla 40	<i>Datos del mecanismo de motor monocilindro.....</i>	185
Tabla 41	<i>Datos Tiempo vs. Fuerza Transmitida Motor monocilindro desbalanceado</i>	186
Tabla 42	<i>Propiedades geométricas y mecánicas de la barra de torsión.....</i>	187
Tabla 43	<i>Esfuerzo y Deformación Unitaria 500rpm Motor monocilindro desbalanceado</i>	188
Tabla 44	<i>Deformación Unitaria Medida 500rpm Motor monocilindro desbalanceado</i>	189
Tabla 45	<i>Error de Deformación Unitaria Calculada y Medida Monocilindro 500rpm desbalanceado.....</i>	191

Índice de figuras

Figura 1 Banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes Tecquipment.....	24
Figura 2 Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes controlado por Computador	27
Figura 3 TM180 Fuerzas en motores reciprocantes	28
Figura 4 Proyecto de Tesis Motor Reciprocante de 4 Cilindros con Programación Electrónica .	29
Figura 5 Prototipo de motor reciprocante de 4 cilindros en V	30
Figura 6 Banco de Pruebas de Balanceo de Masas Reciprocantes Laboratorio de Mecanismos	32
Figura 7 Galgas Extensiométricas Instaladas en la Barra del Torsión del Sistema	32
Figura 8 Configuración de cuatro cilindros en V.....	32
Figura 9 Modelo CAD de sistema de Balanceo de Masas Reciprocantes	36
Figura 10 Acondicionamiento mecánico de los sensores	37
Figura 11 Instrumentación del equipo de balanceo	38
Figura 12 Sistema Electrónico de Adquisición de Datos	39
Figura 13 Interfaz Humano Máquina HMI.....	40
Figura 14 Sistema de Control del Sistema	41
Figura 15 Sistema Completo de Balanceo de masas reciprocantes.....	42
Figura 16 Mecanismo biela manivela	55
Figura 17 Diagrama de mecanismo biela manivela.....	55
Figura 18 Geometría mecanismo biela manivela	56
Figura 19 Mecanismo principal de motores multicilíndricos.....	60
Figura 20 Modelo "V" de la norma VDI para la metodología del proyecto	63
Figura 21 Requerimientos del proyecto ordenados	65
Figura 22 Bastidor del sistema de balanceo de masas reciprocantes	66
Figura 23 Base de sujeción de prototipos de motor reciprocante	66
Figura 24 Dimensiones de la barra en voladizo del bastidor	67

Figura 25	<i>Controlador de velocidad analógico del motor</i>	68
Figura 26	<i>Modelo CAD de la configuración Mono cilindro</i>	69
Figura 27	<i>Diagrama del mecanismo biela manivela</i>	73
Figura 28	<i>Modelo dinámicamente equivalente de la biela</i>	74
Figura 29	<i>Modelo dinámicamente equivalen de la manivela</i>	74
Figura 30	<i>Fuerza centrífuga producida por ma</i>	75
Figura 31	<i>Fuerza inercial producida por las masas reciprocantes mb</i>	76
Figura 32	<i>Diagrama de fuerzas del mecanismo biela manivela balanceado</i>	77
Figura 33	<i>Diagrama de fuerzas de mecanismo biela manivela sobreequilibrado</i>	78
Figura 34	<i>Brazo y fuerza normal de Torque de Sacudimiento Monocilindro</i>	80
Figura 35	<i>Modelo CAD de la configuración de cuatro cilindros en V</i>	82
Figura 36	<i>Dinámica de motor multicilíndrico en línea</i>	88
Figura 37	<i>Diagrama de momentos de sacudimiento motor multicilíndrico</i>	88
Figura 38	<i>Modelo CAD de la configuración de cuatro cilindros en V</i>	90
Figura 39	<i>Ángulo de motor multicilíndrico configuración en V</i>	94
Figura 40	<i>Geometría de motor multicilíndrico en V</i>	95
Figura 41	<i>Transmisor de celda de carga JY-S60</i>	106
Figura 42	<i>Transmisor para celda de carga</i>	108
Figura 43	<i>Transmisor de peso WT65</i>	110
Figura 44	<i>Encoder E6B2-CWZ3E</i>	111
Figura 45	<i>Encoder E40S6-1000-3T-24</i>	113
Figura 46	<i>Encoder serie 28 Hohner</i>	114
Figura 47	<i>Dimensiones Xinje XC3-32RT-E</i>	117
Figura 48	<i>HMI Xinje Touchwin TG865</i>	121
Figura 49	<i>Dimensiones Touchwin TG865</i>	122
Figura 50	<i>Galgas extensiométricas en la barra en voladizo de la máquina</i>	123

Figura 51	<i>Secciones para galgas extensiométricas en la barra en voladizo</i>	123
Figura 52	<i>Galga extensiométrica de torsión 45°</i>	125
Figura 53	<i>Elemento diferencial punto Hs</i>	126
Figura 54	<i>Distribución de las galgas de flexión</i>	127
Figura 55	<i>Conexión de puente de Wheatstone para flexión</i>	128
Figura 56	<i>Puente de Wheatstone de torsión</i>	129
Figura 57	<i>Conexión puente de Wheatstone torsión</i>	130
Figura 58	<i>Diagrama de componentes de la planta</i>	134
Figura 59	<i>Definición de señales intercambiadas entre el sistema de control y la planta</i>	135
Figura 60	<i>Elementos de control e indicadores de interacción con el operador</i>	136
Figura 61	<i>Diagrama de bloques organizacionales del sistema de control</i>	139
Figura 62	<i>Grafcet de la secuencia pirincipal de control</i>	140
Figura 63	<i>Grafcet de la lectura de la varible de torsión</i>	140
Figura 64	<i>Grafcet de la lectura de flexión</i>	141
Figura 65	<i>Grafcet de la lectura de velocidad Angular</i>	141
Figura 66	<i>Arquitectura de navegación de la HMI</i>	150
Figura 67	<i>Diagrama de Navegación de la HMI</i>	151
Figura 68	<i>Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de inicio</i>	152
Figura 69	<i>Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de selección</i>	152
Figura 70	<i>Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de alarmas</i>	153
Figura 71	<i>Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de tendencias</i>	153
Figura 72	<i>Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de procesos</i>	154
Figura 73	<i>Pantalla de Inicio HMI</i>	155
Figura 74	<i>Pantalla de selección HMI</i>	155
Figura 75	<i>Pantalla de alarmas HMI</i>	156
Figura 76	<i>Pantalla de tendencias HMI</i>	156

Figura 77 <i>Pantalla de proceso cilindros en V</i>	157
Figura 78 <i>Pantalla de proceso 4 cilindros en línea</i>	157
Figura 79 <i>Pantalla de proceso monocilindro</i>	158
Figura 80 <i>Distribución y dimensiones de los elementos del tablero eléctrico de control</i>	165
Figura 81 <i>Distribución de canaletas ranuradas en el tablero de control</i>	165
Figura 82 <i>Distribución y dimensiones de los elementos indicadores y HMI</i>	166
Figura 83 <i>Dimensiones de la envolvente</i>	166
Figura 84 <i>Dimensiones de la Tapa y soporte de elementos indicadores y HMI</i>	167
Figura 85 <i>Diseño final del tablero de control vista interior</i>	167
Figura 86 <i>Diseño final del tablero de control vista exterior</i>	168
Figura 87 <i>Mesa de soporte del tablero de control</i>	170
Figura 88 <i>Dimensiones de la mesa de soporte del tablero de control</i>	170
Figura 89 <i>Tablero eléctrico de control preliminar</i>	171
Figura 90 <i>Construcción de la envolvente del tablero de control</i>	172
Figura 91 <i>Tablero de control vista exterior</i>	172
Figura 92 <i>Tablero de control vista interior</i>	173
Figura 93 <i>Cableado y etiquetado de cables</i>	173
Figura 94 <i>Cableado y etiquetado de cables de elementos indicadores y HMI</i>	174
Figura 95 <i>Galgas extensiométricas previo a cambio</i>	174
Figura 96 <i>Galgas extensiométricas de torsión previo a cambio</i>	175
Figura 97 <i>Galgas extensiométricas de flexión previo a cambio</i>	175
Figura 98 <i>Lijado de la barra en el torno</i>	176
Figura 99 <i>Superficie de la galga preparada</i>	176
Figura 100 <i>Proceso de pegado de galgas extensiométricas</i>	177
Figura 101 <i>Ubicación de las galgas en la barra en voladizo con el torno</i>	177
Figura 102 <i>Galga extensiométrica de flexión pegada</i>	178

Figura 103	<i>Galgas extensiométricas y cables pegados en la barra</i>	178
Figura 104	<i>Soldadura de cables de las galgas extensiométricas</i>	179
Figura 105	<i>Galgas extensiométricas montadas en la barra en voladizo</i>	179
Figura 106	<i>Instalación del encoder en la configuración 4 cilindros en línea</i>	180
Figura 107	<i>Arquitectura de comunicación</i>	182
Figura 108	<i>Medidor de tensiones</i>	184
Figura 109	<i>Deformación Unitaria Medida 500rpm Motor monocilindro desbalanceado</i>	190
Figura 110	<i>Deformación Unitaria Calculada y Medida Monocilindro 500rpm desbalanceado</i> .191	
Figura 111	<i>Motor 4 cilindro en línea $\phi_1=0$ $\phi_2=90$ $\phi_3=180$ $\phi_4=270$</i>	192
Figura 112	<i>Captura HMI Motor 4 cilindros</i>	193
Figura 113	<i>HMI Curvas de deformación de flexión y torsión Motor 4 cilindros</i>	193
Figura 114	<i>Fuerza Transmitida vs tiempo Motor Cuatro cilindros</i>	194
Figura 115	<i>Momentos transmitidos vs tiempo Motor Cuatro cilindros</i>	194
Figura 116	<i>Motor 4 Cilindros $\phi_1=0$ $\phi_2=180$ $\phi_3=180$ $\phi_4=0$</i>	195
Figura 117	<i>Captura HMI Motor 4 cilindros en línea</i>	196
Figura 118	<i>Deformación medida</i>	196
Figura 119	<i>Fuerza transmitida vs tiempo</i>	197
Figura 120	<i>Momento transmitido vs tiempo</i>	197

Resumen

En este proyecto de titulación se presenta el diseño e implementación del sistema de adquisición de datos con HMI Interfaz humano máquina, para el banco de pruebas de masas reciprocantes del laboratorio de mecanismos y vibraciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Sangolquí, capaz de adquirir y mostrar las señales de fuerzas y momentos de sacudimiento transmitidos debido a la vibración de diferentes prototipos de motor de combustión interna. Para el diseño del sistema se empleó la metodología descrita en la norma VDI 2206 para diseño mecatrónico, en la cual se realiza el diseño y análisis de la parte mecánica, electrónica y control, para finalmente integrarlas en un producto final. Se realizó una valoración del estado previo de todos los componentes mecánicos, eléctricos y de instrumentación, y se conoció las necesidades y requerimientos de los docentes encargados del laboratorio. A partir de las necesidades y alcance del proyecto se realizó el análisis mecánico dinámico de toda la máquina con sus diferentes configuraciones de mono cilindro, cuatro cilindros en línea y cuatro cilindros en V, identificando las variables que deben ser medidas para comprender el funcionamiento del sistema. El sistema debía tener como característica principal ser robusto usando elementos de control industrial proporcionados por la universidad, el PLC Controlador lógico programable Xinje XC3-32RT-E, y la pantalla HMI TouchWin TG365. Se realizó la selección de componentes y diseño del sistema de adquisición de datos, cambiando los puentes de Wheatstone para obtener gráficas más significativas de deformación, y se instaló un encoder incremental para medir la velocidad angular del cigüeñal con precisión, el sistema de control se encuentra en un tablero eléctrico de control que integra todos los elementos de protección, control, mando e indicadores para garantizar la operación segura, precisa y robusta de la máquina y la pantalla HMI para controlar, y visualizar las variables del sistema.

Palabras Clave: sistema de adquisición de datos, interfaz humano máquina, fuerzas y momentos de sacudimiento, controlador lógico programable, puente de Wheatstone.

Abstract

In this degree project, Design and Implementation of the data acquisition system with HMI human-machine interface, for the reciprocating mass test bench of the mechanisms and vibrations laboratory of the University of the Armed Forces ESPE, Sangolquí campus, capable of acquiring and show the signals of forces and moments of shaking transmitted due to the vibration of different internal combustion engine prototypes. The methodology used to design the system is the described in the VDI 2206 standard for mechatronic design, in which the design and analysis of the mechanical, electronic and control parts are carried out, to finally integrate them into a final product. An assessment of the previous state of all the mechanical, electrical and instrumentation components was carried out, and the needs and requirements of the teachers in charge of the laboratory were known. Based on the needs and scope of the project, the dynamic mechanical analysis of the entire machine was carried out with its different configurations of single cylinder, four cylinders in line and four cylinders in V, identifying the variables that must be measured to understand the operation of the system. The main characteristic of the system was to be robust using industrial control elements provided by the university, the Xinje XC3-32RT-E PLC Programmable logic controller, and the TouchWin TG365 HMI screen. The selection of components and design of the data acquisition system was carried out, changing the Wheatstone bridges to obtain more significant deformation graphs, and an incremental encoder was installed to measure the angular speed of the crankshaft with precision, the control system is located in an electrical control board that integrates all the elements of protection, control, command and indicators to guarantee the safe, precise and robust operation of the machine and the HMI screen to control and visualize the system variables.

Keywords: data acquisition system, human machine interface, shaking forces and moments, programmable logic controller, Wheatstone bridge.

Capítulo I: Generalidades

El capítulo resume los antecedentes previos como proyectos, investigaciones y equipos similares o relacionados a este proyecto de titulación, además se detalla el estado inicial del equipo de laboratorio usado como base para la implementación de este proyecto. Se explica la justificación e importancia que tiene para los estudiantes comprender el funcionamiento del equipo mediante una instrumentación e interfaz adecuados para obtener gráficas y valores de las variables del sistema en tiempo real.

Antecedentes

El proyecto de titulación nace por la necesidad de realizar de manera adecuada las prácticas de laboratorio de Balanceo de Masas reciprocantes en el laboratorio de mecanismos y vibraciones, laboratorio usado por los estudiantes de ingeniería mecánica e ingeniería mecatrónica, el estado del equipo previo a la realización de este proyecto no contaba con la instrumentación, sistema de adquisición y visualización de datos adecuado que muestre las curvas de las variables de fuerza y vibración generadas por el movimiento del motor en las diferentes configuraciones del equipo, además la instrumentación constaba de un encoder de pulsos y galgas extensiométricas cuyo circuito estaba abierto por golpe y el paso del tiempo. Se propone realizar el análisis dinámico del sistema, mantenimiento y acondicionamiento mecánico del sistema para instalar la instrumentación adecuada mediante sensores que permitan captar señales y ser mostradas mediante una interfaz HMI industrial. Se estudiaron proyectos y equipos similares nacionales, extranjeros de producción en serie que mantienen las características del equipo base de este proyecto y mantienen relación con los objetivos y alcance de este proyecto.

Equipos de laboratorio de fabricación en serie

Se exponen las características de equipos de laboratorio fabricados para enseñanza e instrucción de estudiantes de carreras técnicas, producidos en serie por empresas dedicadas al diseño y construcción de equipos didácticos de ingeniería.

Balance of Reciprocating Masses-Tecquipment. El fabricante Tecquipment ofrece el equipo de experimentación de Balanceo de masas Reciprocantes, el sistema está montado mediante un pilar robusto, con una frecuencia natural baja. El pilar sostiene una barra en voladizo que permite la medición de fuerzas, momentos primarios y secundarios; en el extremo de la barra se sitúa el sistema que simula a un motor de combustión interna cuenta con cigüeñal, bielas, casquillos, pistones y el bloque de cilindros. El sistema permite simular motores de uno, dos y cuatro cilindros con configuración variable del cigüeñal, accionado por un motor eléctrico mediante banda y polea, la configuración variable del cigüeñal genera diferencias en la vibración, fuerzas, momentos primarios y secundarios. (Tecquipment LTD, 2022)

Figura 1

Banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes Tecquipment



Nota. Tomado de *Balance of reciprocating masses*, por Tecquipment, 2022, (<https://www.tecquipment.com/es/balance-of-reciprocating-masses>)

La unidad de control e instrumentación procesa las señales de fuerza y momento obtenidas mediante las galgas extensiométricas ubicadas que la barra de torsión que sostienen al motor, cuenta con una unidad de control de conducción electrónica para ajustar y mostrar la velocidad del motor con precisión.

Mediante conexión USB se conecta a un computador con el software VDAS (Sistema Versátil de Captura de Datos), propio del fabricante Tecquipment. (Tecquipment LTD, 20222)

Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes controlado desde Computador con SCADA-Edibon. La empresa Edibon es una empresa reconocida a nivel mundial que fabrica equipamiento didáctico para ingeniería y educación técnica cuenta con el equipo de balanceo de masas reciprocantes de sobre mesa que permite investigar y examinar masas libres y momentos de un motor reciprocante de un solo cilindro, dos y cuatro cilindros. El cigüeñal de la configuración de cuatro cilindros tiene secciones ajustables, permitiendo a los estudiantes variar los ángulos de la manivela por cada cilindro. Las masas oscilantes pueden ser ajustadas añadiendo pesos en el pistón, para ello cada pistón cuentan con un orificio para añadir pesos, los cuales son fijados con seguridad para el funcionamiento del sistema.

El sistema es accionado por un motor eléctrico controlado por computador, se mide la velocidad de giro por un sensor y las fuerzas y momentos son medidos por tres celdas de carga que se encuentran en los apoyos del equipo.

El equipo cuenta con una carcasa de acrílico transparente para proteger a los estudiantes del giro del motor y un botón de paro de emergencia. El sistema se compone de los siguientes elementos:

- Equipo de simulación de motores. - de uno, dos y cuatro cilindros de combustión interna, el sistema es de sobre mesa, para la medición de fuerzas y momentos usa dos celdas de carga ubicadas en la base y una celda de carga lateral, unas levas transmiten la vibración y fuerza a las celdas; el sistema es accionado por un motor eléctrico controlado desde la interfaz. Algo a destacar de este equipo es su construcción segura al contar con un panel acrílico de protección y la placa que muestra el diagrama del sistema de forma gráfica.
- Caja-Interface de Control. - en esta caja se encuentran los circuitos, tarjeta de

adquisición de datos, fuentes de tensión, en la parte frontal destaca el diagrama del proceso y los conectores de sensores, cable de interfaz entre la interface de control y el computador.

- Tarjeta de Adquisición de datos. - la tarjeta de adquisición de datos usada es una PCI Express de National Instruments, esta se aloja en un slot del computador, sus características son:

Tabla 1

Características de la DAQ PCI Express

Característica	Valor
Entradas analógicas	16 single-ended 8 diferenciales
Resolución	16 bits
Velocidad de muestreo	250 KS/s (kilo muestras por segundo)
Rango de Voltajes	$\pm 10V$
Salidas analógicas	2
Velocidad Max. De salida	900 KS/s
Entrada/Salida digital	24
Frecuencias de muestreo digital	0 a 100 MHz
Contadores	4 de 32 bits

Nota. Adaptado de PCIe-6321, por National Instruments, 2023, (<https://www.ni.com/es-cr/support/model.pcie-6321.html>)

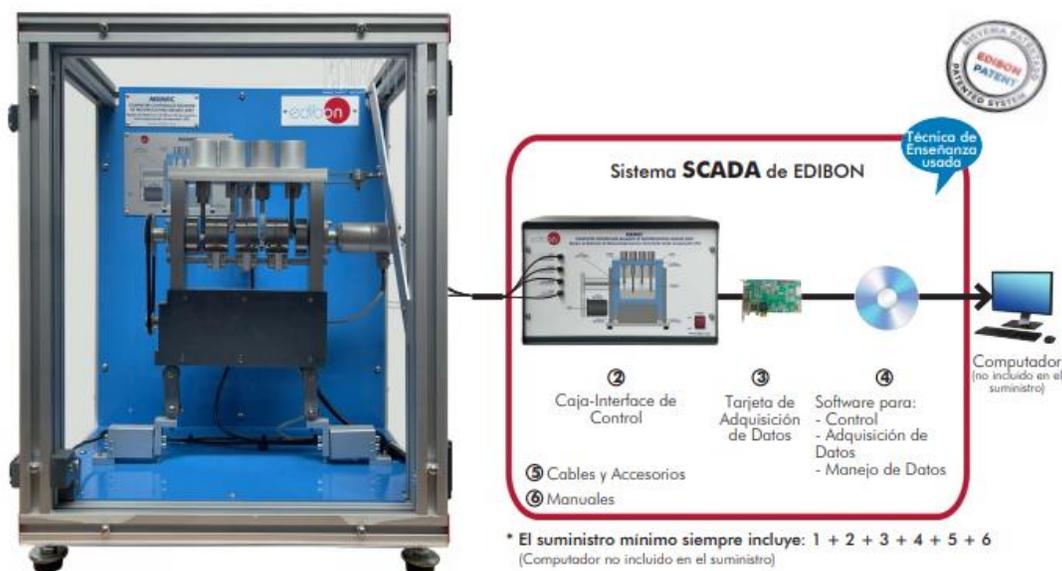
- Paquetes de Software de control, adquisición de datos y manejo de datos. Se compone de 3 softwares que conforman un sistema SCADA propio de la marca, permitiendo registrar y visualizar en tiempo real las variables del proceso de forma gráfica e intuitiva.

El sistema permite realizar la calibración de los sensores, almacenar datos, registrar el estado de alarmas y la modificación de textos e instrucciones.

(Edibon, 2022)

Figura 2

Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes controlado por Computador



Nota. Tomado de *Equipo MBMRC. Equipo de Balanceo de Masas Reciprocantes, Controlado desde Computador (PC)*, por Edibon, 2022, (<https://www.edibon.com/es/equipo-de-balanceo-de-masas-reciprocantes-controlado-desde-computador-pc/catalogo>)

TM 180 Forces in reciprocating engines-GUNT Hamburg. El fabricante alemán de equipos de educación de ingeniería GUNT Hamburg, produce el equipo de experimentación y medición de fuerzas en motores alternativos TM180, que simula motores de uno, dos o cuatro cilindros, accionado mediante un motor de conmutación electrónica, regulado por el número de revoluciones que se muestran en un indicador digital desde la unidad de control. Los ángulos

de los cilindros pueden variar desde el cigüeñal, y la oscilación puede variarse añadiendo pesos adicionales en los pistones.

La medición de las fuerzas y momentos se realizan mediante celdas de carga situadas en la base del modelo. El circuito y tarjeta de adquisición de datos y control del motor están integrados en la unidad de control, esta se comunica mediante conexión USB a un computador con el software propio de la marca GUNT para la visualización de los resultados y variables.

(GUNT Hamburg, 2020)

Figura 3

TM180 Fuerzas en motores recíprocentes



Nota. Tomado de Fuerza en motores alternativos, por Gunt Hamburg, 2020,

(https://gunt.de/images/datasheet/1380/TM-180-Fuerzas-en-motores-alternativos-gunt-1380-pdf_1_es-ES.pdf)

Equipos Nacionales realizados como Proyectos

En el país no existen empresas que fabriquen equipos didácticos para el estudio de ingeniería y en especial de balanceo de masas recíprocentes, sin embargo, se han desarrollado prototipos como proyectos de titulación.

Diseño de un Prototipo de Motor Reciprocante de 4 Cilindros con Programación Electrónica. En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga se realizó un proyecto de tesis de la carrera de Ingeniería Automotriz, de diseño de un prototipo de un motor experimental, con una interfaz electrónica, el proyecto ha dirigido su enfoque al comportamiento dinámico de los motores multicilíndricos de combustión interna, consta de un banco de trabajo de un motor de cuatro cilindros, cigüeñal de fases variables, bielas, y el bloque de cilindros, una interfaz por computador mediante el uso del software LabView, la adquisición de datos se realiza mediante la tarjeta USB 6009 de National Instruments, y un panel de mando con dos microcontroladores que controlan las bobinas del motor paso a paso.

En la interfaz final se puede observar contadores de pulsos, graficas de la posición, velocidad y aceleración de los pistones, giro del cigüeñal, fuerzas de sacudimiento, torque de sacudimiento, curvas de momento no rotatorio, fuerzas y torques en los eslabones producidos por la ignición de los gases, torque de los gases. (Toapanta, 2008)

Figura 4

Proyecto de Tesis Motor Reciprocante de 4 Cilindros con Programación Electrónica



Nota. Tomado de *Prototipo ensamblado con todos los componentes*, por Toapanta, 2008, (<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3846/1/T-ESPEL-0532.pdf>)

Diseño y Construcción de un Prototipo de Motor Reciprocante didáctico para Analizar Fuerzas y Momentos de Sacudimiento en Motores de 4 Cilindros en V, Variando el ángulo de la V. En el año 2006 se realizó como proyecto de tesis de grado para obtención de título de Ingeniero Mecánico en la Universidad de las Fuerzas Armadas la construcción e implementación del modelo de motor de 4 cilindros en V, con el ángulo de a V variables. Es importante resaltar que este proyecto y las configuraciones iniciales de este equipo de motor mono cilindro y motor de 4 cilindros en línea con configuración variable de los ángulos del cigüeñal, conforman la base mecánica de análisis y sobre la cual se desarrolla este proyecto. La instrumentación para medir y observar las fuerzas y momentos de sacudimiento experimentales es la inicial de la máquina, usando un osciloscopio al cual se conectan las galgas extensiométricas ubicadas en la barra de torsión del equipo.

El modelo permite simular un motor de cuatro cilindros en V, con el rango de variación de la V entre 40° a 180° , el cambio de este ángulo permite a los estudiantes comprobar la teoría al observar el incremento o disminución de la fuerzas y momentos de sacudimiento. (Hernández & Rodas, 2006)

Figura 5

Prototipo de motor reciprocante de 4 cilindros en V



Nota. Tomado de *Prototipo ensamblado con todos los componentes*, por Hernández y Rodas, 2006, (<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3846/1/T-ESPEL-0532.pdf>)

Esto del equipo previo al proyecto

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Sangolquí cuenta con una máquina antigua de Laboratorio del fabricante inglés Tecquipment, el equipo consta de un banco de trabajo bastidor de concreto, un sistema de amortiguación mediante un tubo y un amortiguador de caucho, esta base conforma un sistema con frecuencia natural baja, sobre la base de concreto se monta una placa de bronce donde se encuentra el bastidor del motor, este se compone por una columna que sostiene una barra en voladizo sosteniendo un motor eléctrico y el mecanismo de un motor de cuatro cilindros que incluye el cigüeñal de fases variables, bielas, casquillos, pistones y el bloque de cilindros; el mecanismo del motor de cuatro cilindros es intercambiable por configuraciones de motor mono cilindro y motor de cuatro cilindros en V con el ángulo de la V variable. Además, cuenta con una unidad de control analógico para variar la velocidad del motor. La configuración del cigüeñal produce diferentes efectos vibratorios de torsión y flexión que son medidos por galgas extensiométricas ubicadas en la barra de torsión a la altura del centro de masa del motor, el puente de Wheatstone que conforma las galgas extensiométricas está como circuito abierto debido a golpe y deterioro de la protección de las galgas por el tiempo que tiene la máquina. El equipo contaba con un osciloscopio instrumentado para mostrar los datos de deformación medidas por las galgas extensiométricas, y de esta manera representar las fuerzas y momentos de sacudimientos, sin embargo, este equipo no es funcional actualmente en el laboratorio, las prácticas de laboratorio con este equipo se limitaban a la revisión visual de la vibración producida de acuerdo a la configuración del cigüeñal.

Figura 6

Banco de Pruebas de Balanceo de Masas Reciprocantes Laboratorio de Mecanismos

**Figura 7**

Galgas Extensiométricas Instaladas en la Barra del Torsión del Sistema



El sistema mecánicamente se encuentra en buenas condiciones, el motor acciona al prototipo de motor de combustión interna mediante banda y polea, de igual forma el sistema de control y variación de velocidad del motor funciona correctamente.

Figura 8

Configuración de cuatro cilindros en V



Análisis Comparativo

En la Tabla se muestran características importantes para el desarrollo y construcción de este proyecto, permitiendo identificar similitudes y diferencias entre los equipos, trabajos realizados previamente, el estado actual de la máquina, y el resultado final de este proyecto. Es importante destacar que para el desarrollo del sistema de adquisición de datos se usará una interfaz HMI, y equipos indicadores industriales.

Tabla 2

Comparativa entre equipos y trabajos revisados y el proyecto desarrollado

Equipo	Configuraciones	Sensores	Sistema de Adquisición de Datos e Interfaz	Sistema de Control
Balance of Reciprocating Masses-Tecquipment	Uno, dos y cuatro cilindros	Galgas extensiométricas en barra en voladizo, encoder	Sistema Vdas-Tecquipment por computador	Analógico mediante una unidad externa
Equipo da Balanceo de Masas Reciprocantes controlado desde Computador con SCADA-Edibon TM 180	Uno, dos y cuatro cilindros.	Celdas de carga en la base del sistema, encoder	Sistema SCADA-Edibon mediante computador	Digital mediante computador sistema SCADA
	Uno, dos y cuatro cilindros.	Celdas de carga en la base del sistema, encoder	Sistema GUNT mediante computador	Analógico mediante unidad externa
Diseño de un prototipo de motor reciprocante de 4 cilindros con programación Electrónica	Cuatro cilindros	No posee sensores	Sistema en LabView mediate computador	Digital mediante computador
Diseño y Construcción de un prototipo de motor reciprocante didáctico de motores de 4 cilindros en V,	Cuatro cilindros en V	Galgas extensiométricas en barra en voladizo	Osciloscopio analógico	Analógico mediante unidad externa
Estado del equipo previo al proyecto	Uno, cuatro cilindros en línea y cuatro cilindros en V.	Galgas extensiométricas en barra en voladizo	No cuenta con sistema de adquisición de datos e interfaz	Analógico mediante unidad externa
Diseño y construcción de Sistema de Adquisición de datos con interface HMI, para el banco de pruebas de masas reciprocantes	Uno, cuatro cilindros en línea y cuatro cilindros en V.	Galgas extensiométricas en barra en voladizo, encoder	Sistema Industrial mediante PLC, interfaz con HMI industrial	Analógico mediante unidad externa

Justificación e Importancia

En el laboratorio de Mecanismos y Vibraciones de la Universidad de las fuerzas Armadas se encuentra el equipo de Balance de masas reciprocantes elaborado por el fabricante Tecquipment hace más de 20 años, el equipo ya no cuenta con un sistema que permita visualizar las curvas de fuerzas y momentos de sacudimientos captadas por las galgas extensiométricas de la barra en voladizo que soporta al sistema para cuantificar y realizar el balanceo de masas reciprocantes. En los últimos años las prácticas de laboratorio con este equipo se han limitado a la visualización del movimiento producido por el desbalanceo de las diferentes configuraciones del equipo. Este laboratorio es usado por los estudiantes de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica, en la asignatura de Vibraciones, desafortunadamente no se puede acompañar la instrucción teórica con la práctica por la falta de instrumentación del equipo.

El proyecto aportará repotenciando el equipo de laboratorio incluyendo una interfaz industrial HMI, conectada a un sistema robusto con PLC y mediante luces indicadoras industriales, permitirá relacionarse a los estudiantes a un interfaz industrial real y visualizar en tiempo real gráficas y valores de las variables del sistema dinámico.

Alcance del Proyecto

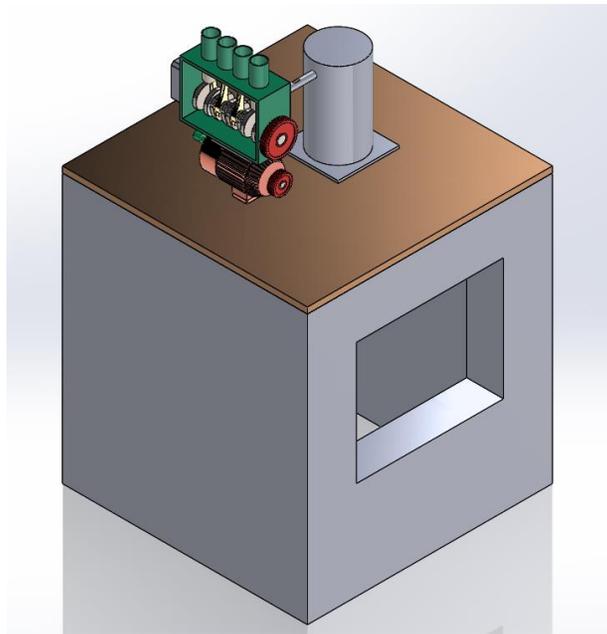
El presente proyecto considera el estudio mecánico de la máquina en su estado actual y el diseño e implementación de todos los subsistemas detallados en el punto anterior. El enfoque principal del proyecto es la instrumentación del equipo permitiendo a los estudiantes usuarios del laboratorio de mecanismos observar las curvas de las variables de torque, fuerza, velocidad y vibración durante el funcionamiento de un sistema de masas reciprocantes. A continuación, se detalla los componentes principales que forman parte del desarrollo del proyecto:

Componente Mecánico

- Estudio mecánico del sistema en sus diferentes configuraciones: motor de uno, dos, cuatro cilindros en V, cuatro cilindros en línea con configuración variable en los ángulos del cigüeñal. Para el estudio mecánico se aplicará la teoría de masas reciprocantes, y se realizará el modelo CAD del sistema, determinando los centros de masas, momentos de inercia, centro de percusión. Se realizará el estudio de las fuerzas y momentos de sacudimiento; con ayuda de software CAE se simulará el comportamiento dinámico de la máquina, determinando las variables que deben ser medidas para que los usuarios comprendan el funcionamiento de balanceo de masas reciprocantes de forma idónea.

Figura 9

Modelo CAD de sistema de Balanceo de Masas Reciprocantes



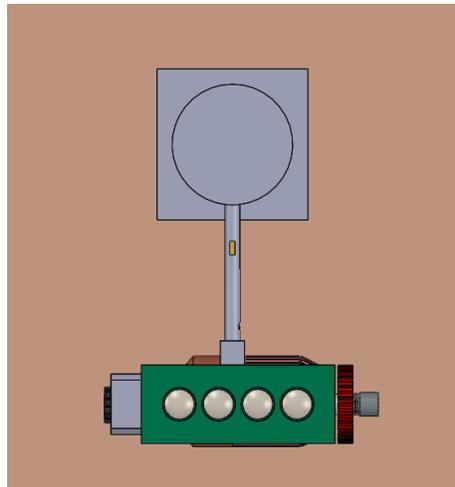
- Mantenimiento mecánico a los componentes de la máquina, se evaluará el estado de todos los elementos de la máquina de ser necesario se cambiaron elementos

móviles como rodamientos, banda de transmisión, y elementos de sujeción como pernos y arandelas.

- Acondicionamiento mecánico de los sensores se refiere a las adaptaciones mecánicas que se realizarán en la máquina de balanceo para garantizar que las señales captadas sean precisas; la instalación de sensores no debe interferir en el comportamiento del sistema para ello se debe considerar la conservación de los centros de masa, la geometría y resistencia de los elementos principales de la máquina.

Figura 10

Acondicionamiento mecánico de los sensores



- Diseño y construcción modular de la estación de control, en esta se situarán la HMI, circuitos de acondicionamiento y adquisición de señales, el controlador y el variador analógico de velocidad del motor.

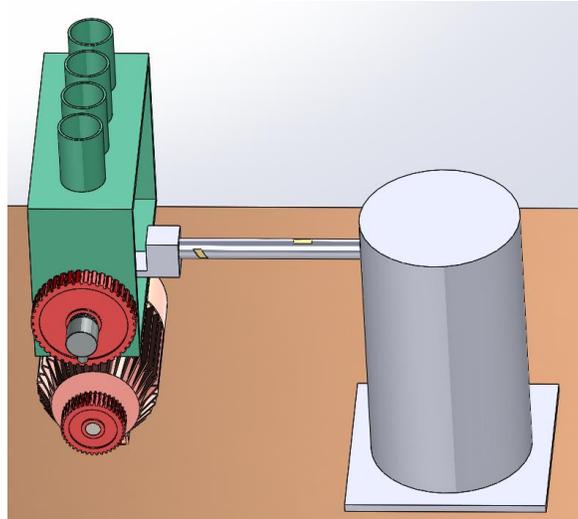
Componente Eléctrico-Electrónico

- Selección de Sensores adecuados que permitan captar las señales necesarias de forma óptima y sin interferir en el comportamiento del sistema, cabe recalcar que el

equipo actual cuenta con galgas extensiométricas en la barra de torsión del bastidor, se debe comprobar su correcta instalación y funcionamiento. La instalación de un sensor de velocidad angular para medir la velocidad del cigüeñal del sistema.

Figura 11

Instrumentación del equipo de balanceo

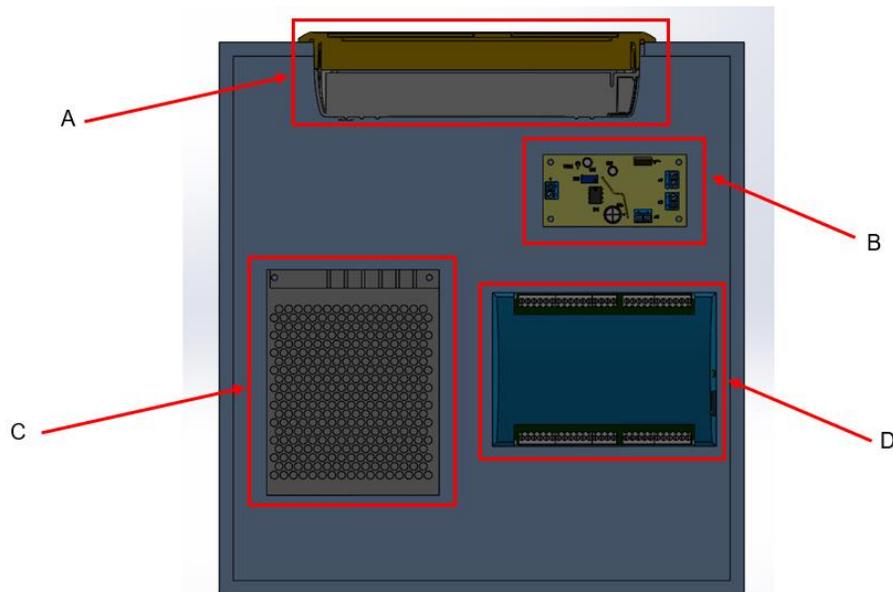


- Diseño de circuito de acondicionamiento de señal de sensores que capte las variables, extraiga la información necesaria mediante circuitos de amplificación, filtrado, y de ser necesario se implementarán circuitos de muestreo y retención; obteniendo una señal adecuada para ser transmitida a la tarjeta de adquisición de datos DAQ.
- Mantenimiento Eléctrico-Electrónico a los componentes eléctricos y electrónicos del motor, variador de velocidad analógico del motor, de ser necesario se cambiará el cableados y conectores del sistema.
- Dimensionamiento de la fuente de voltaje necesaria para alimentar a los sensores, circuitos de acondicionamiento, tarjeta de control, interfaz HMI.

- Diseño de botonera que permita encender el circuito de variación de velocidad y la interfaz.
- Luces indicadoras que muestren las condiciones de funcionamiento del sistema identificando condiciones normales, resonancia y paro.

Figura 12

Sistema Electrónico de Adquisición de Datos



A: Intefaz Humano Máquina HMI TouchWin865-ET

B: Circuito de Acondicionamiento Electrónico

C: Fuente de 24V

D: Tarjeta de Adquisición de Datos DAQ

Componente de Control

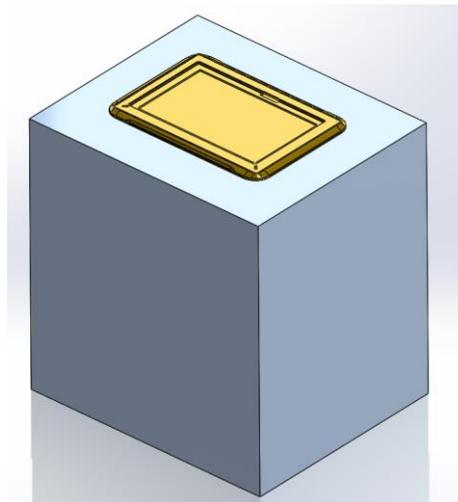
- Selección de la DAQ o tarjeta de Adquisición de Datos y Control, capaz de captar las señales de los sensores, procesarla y transmitir esa información a otros dispositivos, realizando o no acciones de control, la selección de la DAQ debe ser correspondiente al tipo de sensores utilizados, y a los protocolos de comunicación

de los demás elementos del sistema de control electrónico. En el presente proyecto tenemos sensores analógicos (galgas extensiométricas) y sensores digitales (encoder y el acelerómetro), además una HMI TouchWin TG865-ET, con protocolo de comunicación serial RS232.

- Programación de la Tarjeta de control se realizará apoyado de software especializado de la tarjeta de control seleccionado, se usará lenguajes de alto nivel facilitando la tarea de programación de recepción de señales y envío de datos a la HMI.
- Programación de la Interfaz HMI encargada de presentar las curvas de fase señales captadas por los sensores en una pantalla, la HMI disponible en el laboratorio es la TouchWin865-ET del fabricante Xinje, se deberá programar la interfaz de acuerdo a las recomendaciones de la guía GEDIS, obteniendo un sistema navegable intuitivo y que represente correctamente al sistema y todas las variables captadas por los sensores.

Figura 13

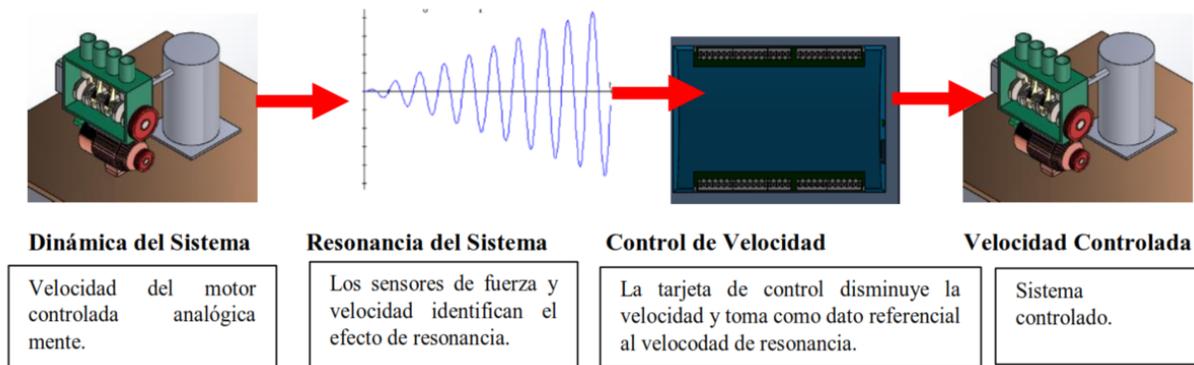
Interfaz Humano Máquina HMI



- Control del Motor a partir de las Fuerzas de Sacudimiento antes de la resonancia, el motor eléctrico cuya velocidad se controla de forma analógica por medio de su unidad de variación de velocidad propia del sistema elaborado por el fabricante Tecquipment, con el fin de evitar daños en el equipo se realizará el control de las fuerzas de sacudimiento generadas por el movimiento de los pistones como masas reciprocantes, si estas fuerzas representan vibraciones cercanas a la frecuencia natural del sistema se mostrarán alarmas en la HMI.

Figura 14

Sistema de Control del Sistema

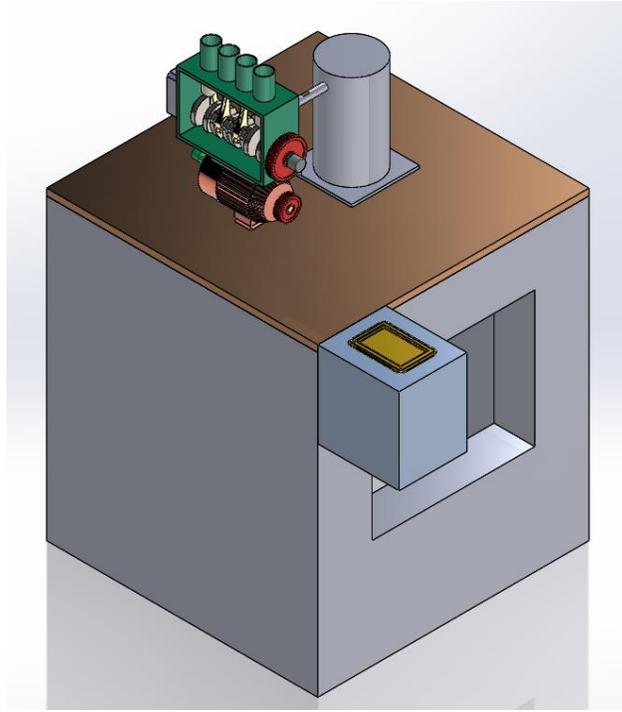


Componente Informático

- Validación de Funcionamiento mediante software especializado se realizará el análisis del comportamiento del sistema, captación de las señales de los sensores y la interfaz HMI validando el funcionamiento y eficiencia del proyecto.
- Elaboración de Documentos Finales como instructivos, manual de funcionamiento, manual de mantenimiento, para que el estudiante usuario del equipo sea capaz de usarlo, comprender y comprobar la teoría de dinámica y balanceo de sistemas dinámicos de masas reciprocantes. Planos de conjunto y de detalle de todos los elementos del sistema, diagramas eléctricos y electrónicos.

Figura 15

Sistema Completo de Balanceo de masas reciprocantes



Objetivos

Los objetivos que se detallan a continuación general y específicos, son los lineamientos a partir de los cuales se desarrolló el proyecto y contenido de los siguientes capítulos.

Objetivo General

Diseñar, construir e implementar el sistema de adquisición de datos del equipo de balanceo de masas reciprocantes del laboratorio de mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".

Objetivos Específicos

- Estudiar y modelar el sistema mecánico de balanceo de masas reciprocantes del laboratorio de mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
- Dimensionar y seleccionar los sensores y elementos electrónicos con base a los

parámetros de funcionamiento del sistema de balanceo para su estudio en tiempo real.

- Diseñar un interfaz humano máquina que muestre las variables de funcionamiento del equipo de balanceo de masas reciprocantes en todas sus configuraciones.
- Realizar pruebas de funcionamiento que permitan evaluar el desempeño del equipo con el sistema de adquisición de datos.
- Realizar la documentación del equipo de balanceo mediante el desarrollo de planos, diagramas, esquemas y manual para proporcionar información sobre el uso y prácticas adecuadas de funcionamiento.

Estructura del Documento

El presente documento corresponde a un proyecto de titulación para obtención de título de ingeniero en Mecatrónica, y consta de 6 capítulos. En el capítulo I, se señalan los antecedentes, justificación e importancia, alcance del proyecto y objetivos; es decir, se detalla la problemática a ser atendida, el propósito y la solución propuesta. En el capítulo II, consta de la investigación previa para el desarrollo del proyecto, mecanismos, sistemas de transmisión, vibración, fuerzas vibratorias, y el estado del arte analizando los proyectos y temas similares al tema de tesis. En el capítulo III se detalla el tipo de metodología usada para desarrollo, pruebas y validación del proyecto; y el estudio mecánico de todos los componentes del sistema. El capítulo IV expone el proceso de diseño del sistema de control y adquisición de datos, selección y dimensionamiento de componentes. El capítulo V muestra la integración del sistema de adquisición de datos con el equipo, pruebas y resultados. El capítulo VI se describen las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la realización del proyecto, y trabajos futuros que puedan ser desarrollados en consecución de este proyecto de titulación.

Capítulo II: Investigación Bibliográfica

El capítulo describe la base teórica para la comprensión y desarrollo de este proyecto, desarrollando temas de física básica como centroides y centros de masa, para luego realizar el estudio del mecanismo biela manivela que es el eslabonamiento base para el funcionamiento de motores de combustión interna, bombas hidráulicas y neumáticas de desplazamiento positivo. Finalmente se describe las características de sistemas de masas reciprocantes, para el desarrollo de este capítulo se tomó como referencia diferentes libros y autores para el diseño y estudio de la máquina de balanceo de masas reciprocantes.

Centroides y centros de masa

El centroide corresponde al punto dentro un área o de un espacio con n - dimensiones donde se considera está concentrada el área o dimensiones totales de una figura o espacio, este punto también es llamado baricentro, y geoméricamente representa a la intersección de todos los hiperplanos que dividen al cuerpo, en dos partes de igual valor con respecto al hiperplano.

El centro de masa es el punto de un cuerpo donde se considera está concentrada la masa, dinámicamente en un sistema discreto es el punto geométrico que puede representar a toda la masa de un cuerpo como una sola partícula, es decir en este punto se aplicaría la resultante de las fuerzas externas del sistema. Este concepto es diferente al relacionado con el centro de peso o centro de gravedad, que es el punto donde se concentra todo el peso, es decir la fuerza ejercida por la masa y la gravedad.

Las diferencias importantes entre estos conceptos es que el centroide es pura mente geométrico y depende de la forma del sistema, el centro de masa depende de la distribución de materia de un cuerpo, y el centro de gravedad depende del campo gravitatorio que actúa sobre un cuerpo.

En el estudio estático o dinámico de un sistema el centroide, centro de masa y centro de gravedad pueden coincidir en el mismo punto, a pesar de representar conceptos diferentes, si el centroide y el centro de masa coinciden quiere decir que el cuerpo es de densidad uniforme. De forma general el cálculo de centroides, centros de masa y centros de gravedad se puede calcular mediante la integral:

$$\vec{r}_c = \frac{\int \vec{r} da}{R}$$

Donde:

\vec{r}_c : es el punto vectorial geométrico (centroide, centro de masa, centro de gravedad) en función de a

\vec{r} : es el vector de n dimensiones correspondientes a las distancias al centroide del área, o volumen da, que se miden en dirección paralela a los ejes de n-dimensiones.

da: corresponde al diferencial en la dimensión correspondiente (área, volumen, masa, peso)

R: es la dimensión característica del cuerpo (volumen, masa, peso)

Para el cálculo de centroides la expresión sería:

$$\vec{r}_{GEO} = \frac{\int \vec{r} dV}{V}$$

Donde:

dV: Diferencial de volumen

V: El volumen del cuerpo

Centros de masa:

$$\vec{r}_{CDM} = \frac{\int \vec{r} dm}{M} = \frac{\int \rho(\vec{r})\vec{r} dV}{M}$$

Donde:

dm: es el diferencial de masa

M: es la masa del cuerpo

La expresión se puede expresar en función de la densidad del cuerpo ρ

Centros de gravedad:

$$\vec{r}_{CDG} = \frac{\int \vec{r} dp}{P} = \frac{\int g\rho(\vec{r})\vec{r} dV}{P}$$

dp : Diferencial de peso

P : Peso del cuerpo

g : gravedad

Estas expresiones vectoriales pueden descomponerse en sus respectivos componentes

obteniendo:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} \int x da \\ \int y da \\ \int z da \end{bmatrix}$$

De igual manera se puede continuar simplificando las expresiones, para cuerpos pequeños la gravedad es constante, la expresión sería:

$$\vec{r}_{CDG} = \frac{g \int \rho(\vec{r})\vec{r} dV}{gM} = \vec{r}_{CDM}$$

De esta manera el centro de gravedad es igual al centro de masa, además si el cuerpo tiene densidad homogénea el centro de masa será igual al centro geométrico o centroide.

$$\vec{r}_{CDM} = \frac{\rho \int \vec{r} dV}{\rho V} = \vec{r}_{GEO}$$

De forma analítica un sistema continuo S se puede descomponer en subsistemas S_i cuyas masas y centros de masas son conocidos, de esta manera se puede encontrar el centro de masa de todo el sistema.

$$\vec{r}_{CDM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{i=N} m_i} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_N x_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N}$$

Este mismo principio es aplicable para el cálculo de centroides, y centros de gravedad.

Momentos de inercia

El momento de inercia de masa de un cuerpo representado por la letra I , corresponde a la resistencia de un cuerpo a la aceleración angular, de forma análoga a la masa que es la resistencia de un cuerpo a la aceleración, justificando las expresiones:

$$M = I\alpha$$

$$F = ma$$

Donde

M : Momento

I : Momento de Inercia

F : Fuerza

m : masa

a : Aceleración

El momento de inercia de un área, es decir dos dimensiones, se conoce como el momento rectangular de inercia de un área A , y se expresan:

$$I_x = \int y^2 dA \quad I_y = \int x^2 dA$$

Donde:

I_x : Momento de inercia con respecto al eje X

y : es la distancia perpendicular al eje x

dA : diferencial de área, representa una tira delgada paralela al eje x, de manera que todos los puntos de dicha tira están a la misma distancia y del eje x .

I_y : Momento de inercia con respecto al eje Y

x : es la distancia perpendicular al eje y

dA : diferencial de área, representa una tira delgada paralela al eje y, de manera que todos los puntos de dicha tira están a la misma distancia x del eje y .

La suma de los momentos rectangulares de un área se conoce como momento polar de inercia, y corresponde al momento de inercia perpendicular al plano, es decir con respecto al origen del sistema O, es decir con respecto al eje Z. El momento polar de inercia se representa por J_o y se expresa de por la ecuación:

$$J_o = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2)dA = \int x^2 dA + \int y^2 dA$$

Donde:

r : es la distancia de O al diferencial de área dA , el cuadrado de esta distancia es $r^2 = x^2 + y^2$

Se obtiene: $J_o = I_x + I_y$

Otro concepto importante es el radio de giro K , que representa la distancia a la que debe concentrarse el área o la masa de un cuerpo, si el momento de inercia permanecerá constante con respecto a un eje.

De forma analítica el momento de inercia se define como la integral del segundo momento alrededor del eje de todos los elementos de masa dm que componen el cuerpo (Hibbeler, 2010).

$$I_z = \int_m r^2 dm$$

r : El brazo de momento, es la distancia perpendicular del eje z al elemento arbitrario m

Para un cuerpo de tres dimensiones x , y , y z ; el momento de inercia de un diferencial de masa dm , con respecto a uno de los ejes, depende de la distancia de dm al eje, obteniendo las expresiones:

$$I_x = \int (y^2 + z^2)dm$$

$$I_y = \int (z^2 + x^2)dm$$

$$I_z = \int (x^2 + y^2)dm$$

Las expresiones de los momentos de inercia ubican al origen del sistema de coordenadas en el centroide de la superficie, o centro del masa del cuerpo; si se desea expresar el momento de inercia con respecto a un sistema de coordenadas cuyo origen no está en la misma posición del CG del cuerpo será necesario usar el teorema de ejes paralelos, o teorema de Steiner, en el cual se debe considerar la suma de la distancia entre el sistema de coordenadas y el CG y la distancia entre el CG y el diferencial de masa dm .

$$I_x = \int (y^2 + z^2) dm = \int [(y' + \bar{y})^2 + (z' + \bar{z})^2] dm$$

Al desarrollar esta expresión se obtiene:

$$I_x = \bar{I}_{x'} + m(\bar{y}^2 + \bar{z}^2)$$

Esto es igual para los momentos de inercia en cualquiera de los ejes, pudiendo expresar el momento de inercia con respecto a un sistema cuyo origen no está en el CG del cuerpo como:

$$I = \bar{I} + md^2$$

Donde d es la distancia entre el origen del sistema de I y el origen del sistema \bar{I} .

Fuerzas y Momentos de Sacudimiento

Las fuerzas dinámicas tienen un efecto neto sobre cada uno de los eslabones y bastidor de un mecanismo que está sometido a movimiento, estas fuerzas vectoriales se transmiten de eslabón a eslabón hasta el eslabón del bastidor, el resultado de estas fuerzas es conocido como fuerzas y momentos de sacudimiento, es decir, que la suma de las fuerzas que actúan sobre el bastidor da como resultado las fuerzas de sacudimiento, representadas por F_s .

$$F_s = \sum_{i=2}^n F_{i1}$$

Donde:

F_s : Fuerza de Sacudimiento

n : Número de eslabones conectados al bastidor

F_{i1} : Fuerzas que actúan sobre el bastidor

El momento de reacción que produce el bastidor se conoce como momento de sacudimiento y se denota por M_s . Es resultado del torque negativo de la fuente de movimiento más el producto cruz de las fuerzas de los pasadores de las articulaciones entre el bastidor y otros eslabones y las distancias hasta el punto de referencia.

$$M_s = T_{21} + (R_1 \times F_{41})$$

Donde:

M_s : Momento de Sacudimiento

T_{21} : Torque de la fuente de movimiento

R_1 : Distancia entre el pasador del eslabón y el bastidor

F_{41} : Fuerza del pasador de las articulaciones entre el bastidor y el eslabón

Las fuerzas de sacudimiento tratarán de mover al bastidor hacia delante y atrás, y el momento de sacudimiento tratará de balancear el plano del bastidor sobre el eje de la línea de transmisión. En ambos casos causarán vibración; para disminuir o eliminar las fuerzas y momentos de sacudimiento que causan vibración se debe balancear el sistema, añadiendo un volante de inercia, o aislando el bastidor del resto de la maquinaria mediante un elemento que absorba las vibraciones. (Norton, 2020)

Balanceo

Si un eslabón o cuerpo que está sometido a rotación pura puede estar perfectamente balanceado eliminando todas las fuerzas y momentos de sacudimiento, en el diseño de maquinaria se desea balancear todos los elementos rotatorios hasta que las fuerzas de sacudimiento estén eliminadas o dentro de un rango aceptable. El balance de un elemento rotatorio puede ser realizado estáticamente o dinámicamente. Sin embargo, para que un

elemento rotatorio esté balanceado correctamente se debe realizar el balanceo dinámico; el balanceo estático es considerado un subconjunto del dinámico, que puede ser una solución más sencilla de realizar y puede dar como resultado valores aceptables o muy bajos de vibración.

Los elementos rotatorios de un mecanismo deberían ser diseñados para estar balanceado de manera inherente por su geometría, sin embargo, la falta de exactitud en las tolerancias de manufactura produce pequeños des balanceos que cada parte del mecanismo. El procedimiento de balanceo se realiza a cada parte después de la manufactura o después de largo periodos de operación de la maquinaria que hayan desgastado los elementos rotatorios incrementando las fuerzas y momentos de sacudimiento; el procedimiento de balanceo se realiza midiendo la magnitud y localización del desbalanceo de manera precisa y compensándolo añadiendo o removiendo material en la ubicación correcta.

Balanceo Estático

El balanceo estático no se refiere al balanceo de un elemento que no está en movimiento, el balanceo estático se realiza sobre cuerpo que están rotando y busca que la suma de las fuerzas dinámicas del sistema dé como resultado cero.

$$\sum F - ma = 0$$

Este tipo de balanceo es conocido como balanceo de plano simple ya que es útil para masas en dos dimensiones, en elementos giratorios corresponde a dispositivos con dimensiones pequeñas en el eje axial en comparación con sus dimensiones del eje radial. Es decir, es aplicable a ruedas de bicicleta, engranajes simples, una polea montada sobre un eje, etc.

Para realizar el sistema se debe obtener el Centro de masa del elemento giratorio, esto permitirá concentrar la masa en un solo punto, si el centro de masa coincide con el centro de giro, el sistema está balanceado, si la forma y geometría del elemento giratorio es compleja se

puede descomponer en diferentes cuerpos con sus respectivos centros de masa, asumiendo que el sistema tiene una velocidad angular constante ω , solo se tiene aceleraciones centrípetas dirigidas al centro de giro, las fuerzas de inercia serán centrífugas, considerando como centro del sistema de coordenadas el centro de giro, se debe satisfacer la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n -m_1 R_1 \omega^2 - m_2 R_2 \omega^2 - \dots - m_i R_i \omega^2 = 0$$

Donde:

m_i : Masa de unos de los componentes del elemento giratorio

R_i : Vector de radio de giro desde el centro de giro al centro de masa CG_i de la masa m_i

ω : Velocidad angular del sistema

Si la sumatorio no satisface la ecuación $\sum F - ma = 0$, para balancear el sistema se debe encontrar una masa m_b , cuyo centro de masa CG_b , este ubicado en un vector posición R_b , que permita igualar la suma de fuerzas a cero.

$$\sum_{i=1}^n -m_1 R_1 \omega^2 - m_2 R_2 \omega^2 - \dots - m_i R_i \omega^2 - m_b R_b \omega^2 = 0$$

Para el balanceo estático solo se toman en cuenta las fuerzas inerciales, no se considera las fuerzas externas del sistema, ya que las fuerzas externas no pueden ser balanceadas realizando cambios internos en la geometría.

Para resolver la expresión se cancela el término de velocidad angular ω , es decir, no importa que tan rápido gire el sistema; si existe un desbalanceo la magnitud de la fuerza de sacudimiento dependerá de la velocidad angular.

$$-m_1 R_1 - m_2 R_2 - \dots - m_i R_i = m_b R_b$$

Esta ecuación se puede descomponer en las componentes vectoriales en el plano simple de dos dimensiones y usando expresiones trigonométricas en coordenadas polares podremos resolver el sistema.

$$m_b R_{Bx} = -m_1 R_{1x} - m_2 R_{2x} - \dots - m_i R_{ix}$$

$$m_b R_{By} = -m_1 R_{1y} - m_2 R_{2y} - \dots - m_i R_{iy}$$

$$\theta_b = \arctan \left(\frac{m_b R_{By}}{m_b R_{Bx}} \right)$$

Balanceo Dinámico

El balanceo dinámico satisface dos criterios, la suma de fuerzas y la suma de momentos debe ser cero. Los momentos actúan en todos los planos incluido el eje de rotación.

$$\sum F = 0$$

$$\sum M = 0$$

Los sistemas giratorios cuyas dimensiones son relativamente mayores en el eje axial en comparación con el eje radial, requieren un balanceo completo estático y dinámico para evitar fuerzas de sacudimiento. Sin embargo, existen sistemas que pueden estar estáticamente balanceados, pero no cumplen con el balanceo dinámico, esto se debe a que las masas que componen el sistema están distribuidas al largo del eje axial, las fuerzas inerciales de estas masas forman un par oscilante giratorio, produciendo un desbalanceo de izquierda a derecha en los extremos del eje. Los elementos mecánicos más comunes que requieren balanceo dinámico son rodillos, cigüeñales, árboles de levas, ejes, grupos de engranajes múltiples, rotores de motores, turbinas, todos se caracterizan por que su masa está distribuida de manera desigual con respecto al eje de giro, o de manera longitudinal en eje axial.

Para un correcto balanceo dinámico es necesario remover o añadir la correcta cantidad de masa en una ubicación específica en dos planos de corrección, separados por una distancia en el eje axial. Esta masa añadida o removida creará la contrafuerza necesaria para balancear dinámicamente al sistema y el par necesarios para cancelar el momento de desbalanceo. Es recomendable primero realizar el balanceo estático de un sistema, esto reducirá la magnitud del desbalanceo dinámico a ser corregido, y reducirá el momento de flexión en el eje de giro.

Para realizar el balanceo dinámico se debe considerar un sistema de coordenadas de tres dimensiones donde el eje axial es el eje Z, las masas están distribuidas a lo largo del eje axial, sus centro de gravedad CG, valor de la masas y ubicaciones angulares son conocidos, para el balanceo dinámico se considera la aceleración angular nula, y nos ayudamos de dos planos auxiliares A y B donde se ubicarán las masas m_A y m_B con su respectivas ubicaciones R_A y R_B , a diferencia del balanceo estático tenemos el doble de variables desconocida, para resolver el sistema necesitamos la ecuación de la suma de momentos que podemos obtener a partir de la ubicación de los planos arbitrario A y B, escogiendo uno de estos planos como origen.

$$\left(\sum_{i=1}^n -m_1 R_1 \omega^2 - m_2 R_2 \omega^2 - \dots - m_i R_i \omega^2 \right) - m_A R_A \omega^2 - m_B R_B \omega^2 = 0$$

$$\left(\sum_{i=1}^n -m_1 R_1 \omega^2 l_1 - m_2 R_2 \omega^2 l_2 - \dots - m_i R_i \omega^2 l_i \right) - m_B R_B \omega^2 l_B = 0$$

Donde:

m_A : masa que debe ser añadida en el plano A para obtener un sistema balanceado

m_B : masa que debe ser añadida en el plano B para obtener un sistema balanceado

l_i : es la distancia en z de la masa m_i al punto A considerado como origen

l_B : es la distancia en Z del plano auxiliar B al punto A

Mecanismo Biela Manivela

El mecanismo biela manivela o manivela corredera es un eslabonamiento que permite transformar el movimiento circular de una manivela en un movimiento lineal, o viceversa; el elemento giratorio es conocido como manivela, conectado a un segundo eslabón llamado biela o corredera, este tiene un movimiento lineal alternativo de avance y retroceso. Este mecanismo es de los más usados en máquinas y mecanismos, y son la base de funcionamiento de los motores de combustión interna, bombas hidráulicas y neumáticas de desplazamiento positivo, maquinaria, etc. (Olmedo & Echeverría, 2018)

Figura 16

Mecanismo biela manivela

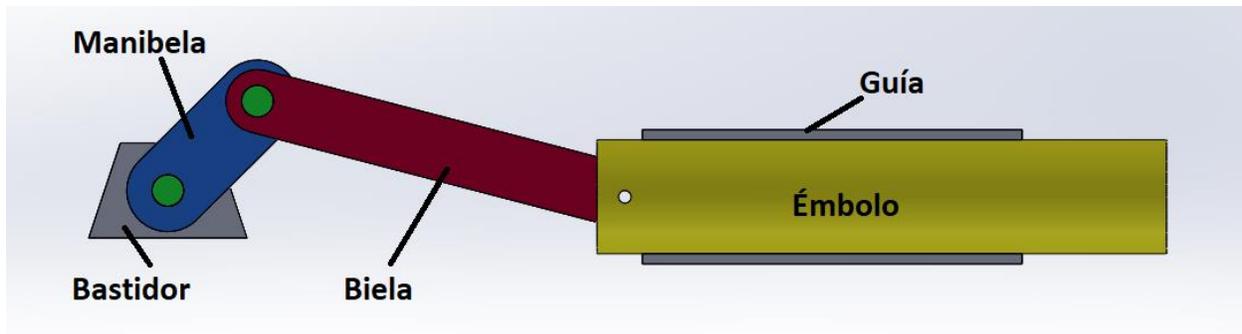
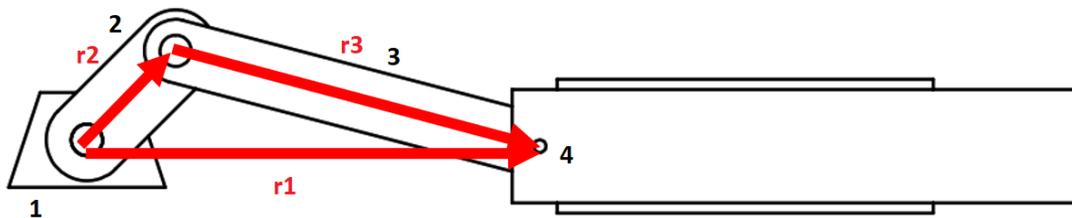


Figura 17

Diagrama de mecanismo biela manivela



$$\vec{r}_2 + \vec{r}_3 = \vec{r}_1$$

En notación de algebra compleja se expresa:

$$r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} = r_1$$

$$r_1 = r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3)$$

$$0 = r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3)$$

Resolviendo, obtenemos:

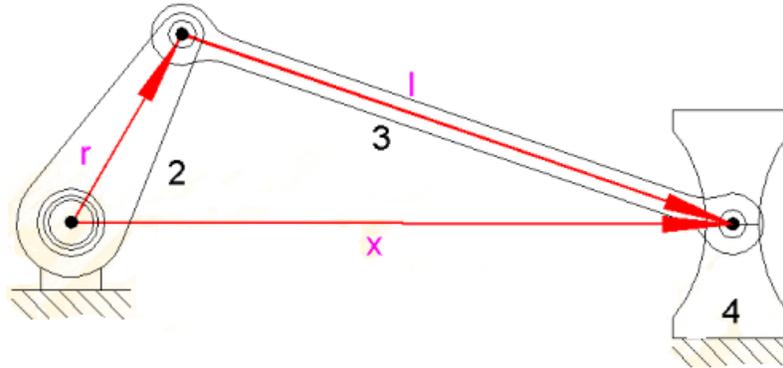
$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(-\frac{r_2}{r_3} \sin(\theta_2) \right)$$

$$r_1 = r_2 \cos(\theta_2) + \sqrt{r_3^2 - r_2^2 \sin^2(\theta_2)}$$

Esta expresión se puede simplificar realizando la siguiente consideración geométrica:

Figura 18

Geometría mecanismo biela manivela



Nota. Adaptado de Circuito vectorial, 2018, por Olmedo y Echeverría, Máquinas y Mecanismos.

$$\frac{r}{l} \leq \frac{1}{3}$$

El desplazamiento de x se expresa:

$$x(\theta_2) = r \cos(\theta_2) + l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2}$$

De la expresión obtenida del desplazamiento de x, se puede diferenciar en función del tiempo y obtener la velocidad y aceleración lineal.

Velocidad lineal de r_3 :

$$\dot{x} = -r\omega \left[\sin(\omega t) + \frac{r}{2l} \frac{\sin(2\omega t)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\omega t)\right)^2}} \right]$$

Aceleración lineal r_3 :

$$\ddot{x} = -r\omega^2 \left[\cos(\omega t) - \frac{r[l^2(1 - 2\cos^2(\omega t) - r^2 \sin^4(\omega t))]}{[l^2 - (r \sin(\omega t))^2]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Las ecuaciones obtenidas son ecuaciones polinómicas que para ser resueltas será necesario el uso de recursos computacionales, sin embargo, para comprender de manera más sencilla el comportamiento dinámico del mecanismo, se usa el teorema binomial para expandir el radical en la expresión de desplazamiento de x .

Expresando un binomio $(a + b)$ elevado a una potencia n , como una serie:

$$(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{2!}a^{n-2}b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}a^{n-3}b^3 + \dots$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2} = \left[1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1 - \frac{1}{2\left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2} - \frac{1}{8}\left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^4 - \frac{1}{16}\left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^6 - \dots$$

$$= 1 - \left(\frac{r^2}{2l^2} \sin^2(\theta_2)\right) - \left(\frac{r^4}{8l^4} \sin^4(\theta_2)\right) - \left(\frac{r^6}{16l^6} \sin^6(\theta_2)\right)$$

Considerando que r/l es un valor menor a 1, se puede simplificar:

$$\left[1 - \left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2\left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2}$$

Aplicando identidades trigonométricas obtenemos:

$$1 - \frac{1}{2\left(\frac{r}{l} \sin(\theta_2)\right)^2} = 1 - \frac{r^2}{4l^2}(1 - \cos(2\theta_2))$$

Finalmente obtenemos la expresión:

$$x = l - \frac{r^2}{4l} + r[\cos(\theta_2) + \frac{r}{4l} \cos(2\theta_2)]$$

Considerando que $\theta_2 = \omega t$ obtenemos las expresiones de velocidad y aceleración en función del tiempo

$$x(t) = l - \frac{r^2}{4l} + r[\cos(\omega t) + \frac{r}{4l} \cos(2\omega t)]$$

$$v(t) = -r \omega \sin(\omega t) + \frac{r}{2l} \sin(2\omega t)$$

$$\ddot{x} = a(t) = -r \omega^2 [\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t)]$$

Análisis de Fuerzas en el Mecanismo biela-manivela

El análisis de fuerzas dinámico del mecanismo biela manivela es importante para comprender los momentos y fuerzas generados por el movimiento de cada eslabón, y comprender las características que deberá tener un sistema balanceado con este mecanismo. Para el análisis se debe realizar es estudio cinemático del sistema, obteniendo las aceleraciones angulares y lineales considerando los centros de gravedad CG de cada eslabón, de esta manera el análisis de fuerzas se expresa como la suma de las todas las fuerzas y momentos:

$$\sum F = ma \quad \sum M = I_G \alpha$$

Es conveniente separar los componentes vectoriales de las fuerzas en x , y y ; la suma de momentos se representa la dirección de Z , obteniendo:

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y \quad \sum M = I_G \alpha$$

Realizando el análisis para cada eslabón, se obtiene:

Eslabón 2, considerando que T_{12} es el torque

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 a_{G_{2x}}$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 a_{G_{2y}}$$

$$T_{12} + (R_{12x}F_{12y} - R_{12y}F_{12x}) + (R_{32x}F_{32y} - R_{32y}F_{32x}) = I_{G_2} \alpha_2$$

Eslabón 3:

$$F_{43x} - F_{32x} = m_3 a_{G_{3x}}$$

$$F_{43y} + F_{32y} = m_3 a_{G_{3y}}$$

$$\left(R_{43x}F_{43y} - R_{43y}F_{43x}\right) - \left(R_{23x}F_{32y} - R_{23y}F_{32x}\right) = I_{G_3}\alpha_3$$

Eslabón 4, considerando que F_p es la fuerza externa:

$$F_{14x} - F_{43x} + F_{p_x} = m_4 a_{G_{4x}}$$

$$F_{14y} - F_{43y} + F_{p_y} = m_4 a_{G_{4y}}$$

$$\left(R_{14x}F_{14y} - R_{14y}F_{14x}\right) - \left(R_{34x}F_{43y} - R_{34y}F_{43x}\right) + \left(R_{p_x}F_{p_y} - R_{p_y}F_{p_x}\right) = I_{G_4}\alpha_4$$

Motores Multicilíndricos

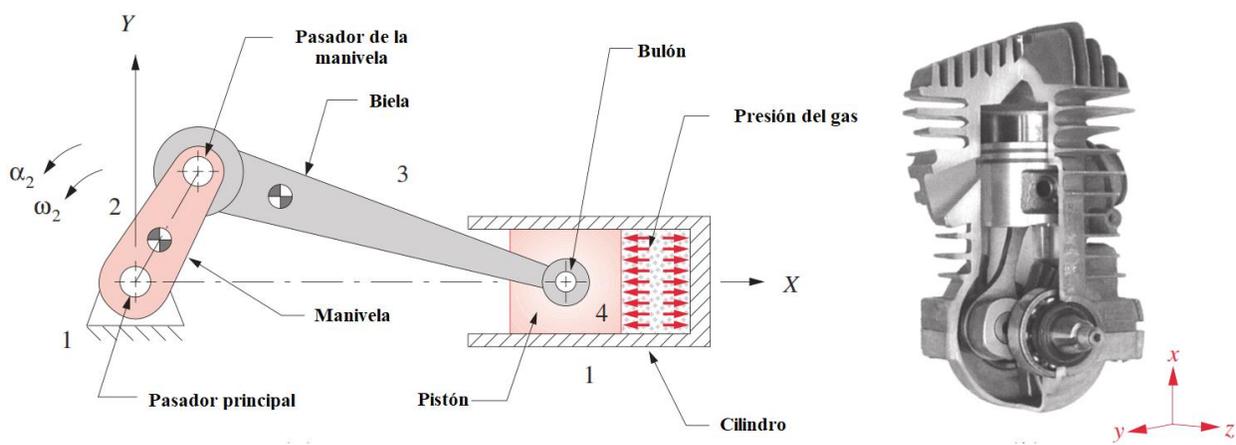
El motor de combustión interna es una máquina que a partir de energía química obtenida de la explosión de un combustible dentro de una cámara de combustión obtiene energía mecánica para mover e impulsar un objeto; esta máquina es una de las invenciones más importantes hechas por el ser humano ya que ha permitido revolucionar la industria del transporte mejorando la calidad de vida de las personas.

El mecanismo básico de un motor de combustión interna es biela-manivela, con diferentes configuraciones dependiendo del uso del motor y el costo deseado de fabricación, existen motores multicilíndricos con 4 pistones en configuración en línea, 8 pistones en configuración en V, etc., repitiendo el principio del mecanismo de biela manivela obteniendo salidas diferentes de velocidad y potencia. El diseño geométrico del cigüeñal, que es un eje acodado de contrapesos que representa a la manivela del mecanismo, y el diseño de los cilindros son determinantes en el comportamiento dinámico del motor.

Dentro de la cámara de combustión del cilindro se produce la explosión de la mezcla de combustible y comburente, esta explosión provoca el movimiento del pistón girando la manivela del mecanismo, en el caso de autos de combustión interna la manivela es el cigüeñal, la explosión producida dentro de cada cilindro aporta al giro del cigüeñal que mediante el sistema de transmisión del auto mueve las ruedas obteniendo un desplazamiento.

Figura 19

Mecanismo principal de motores multicilíndricos



Nota. Tomado de Four bar slider-crack mechanism, 2020, por Norton, Design of Machinery.

De manera inversa se puede tener la fuente de potencia en el cigüeñal, generalmente por un motor eléctrico, dentro del cilindro ingresa aire, agua o cualquier otro fluido, como resultado se obtiene aire comprimido, o bombeo hidráulico.

El cigüeñal solo recibe la energía de la explosión durante la carrera de potencia del cilindro, para que el ciclo se repita el cigüeñal debe ser capaz de regresar del punto muerto inferior al punto muerto superior por su propio impulso, se conoce como punto muerto cuando el pistón está la posición máxima o mínima dentro del cilindro. Este efecto se consigue por la geometría del cigüeñal, la energía cinética se almacena como energía potencial debido a la ubicación del centro de masa de la manivela y permite que el ciclo de combustión se repita. (Norton, 2020)

Capítulo III: Metodología de diseño y estudio mecánico del sistema

En este capítulo se define la metodología de diseño sobre la que se desarrolla el proyecto, optando por una metodología orientada al diseño de productos mecatrónicos. A partir del modelamiento CAD de la estación es posible identificar los requerimientos del sistema, asimismo, mediante el modelamiento CAD y estudio dinámico de las diferentes configuraciones del mecanismo se analiza el balanceo del sistema, los torques de sacudimiento, las fuerzas y momentos transmitidos que se presentan en el sistema para cada una de las tres configuraciones.

Metodología de Diseño

Se toma como guía la metodología propuesta por la norma VDI 2206, perteneciente a la Asociación de Ingenieros Alemanes desde el año 2004, ya que proporciona asistencia en el proceso de diseño mecatrónico mediante la herramienta del modelo “V” para identificar interacciones entre varias disciplinas y realizar verificaciones de forma iterativa, el presente proyecto se dividirá en tres subsistemas principales que se desarrollaran de forma independiente para su posterior integración y obtener como producto el banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes instrumentado y con un interfaz HMI que permita al usuario observar las curvas de variación de velocidad, y fuerzas de sacudimiento, torsión y flexión.

Procedimiento del modelo “V”

Definición de requerimientos

El laboratorio de Mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, cuenta con un banco de pruebas de balanceo de masas reciprocantes fuera de servicio por falta de instrumentación y sistema de adquisición de señales, se requiere implementar instrumentación correspondiente y un interfaz humano máquina para observar en tiempo real las señales captadas por los sensores.

Diseño del sistema

El sistema se compone de tres módulos principales: mecánico, electrónico y de tecnología de la información. El estudio mecánico se refiere al análisis dinámico del sistema. El diseño electrónico corresponde a la selección y acondicionamiento de sensores, tarjeta de adquisición de datos y fuentes de potencia. Las tecnologías de la información corresponden a la programación del interfaz humano máquina HMI y el controlador lógico programable.

Diseño de campo específico

Se realizará el diseño, dimensionamiento y selección de circuitos de acondicionamiento electrónico de señales que permitan transmitir la señal captada por los sensores de forma adecuada a la tarjeta de adquisición de señales. Además, se diseñará mediante el uso de software CAD/CAE los elementos necesarios para el acondicionamiento mecánico de los sensores. Finalmente se programará el controlador y la interfaz en una pantalla HMI industrial.

Integración del sistema

Después de validar el correcto funcionamiento de cada subsistema de forma independiente, se implementarán e integrarán en un sistema conjunto obteniendo un equipo funcional.

Verificación y validación

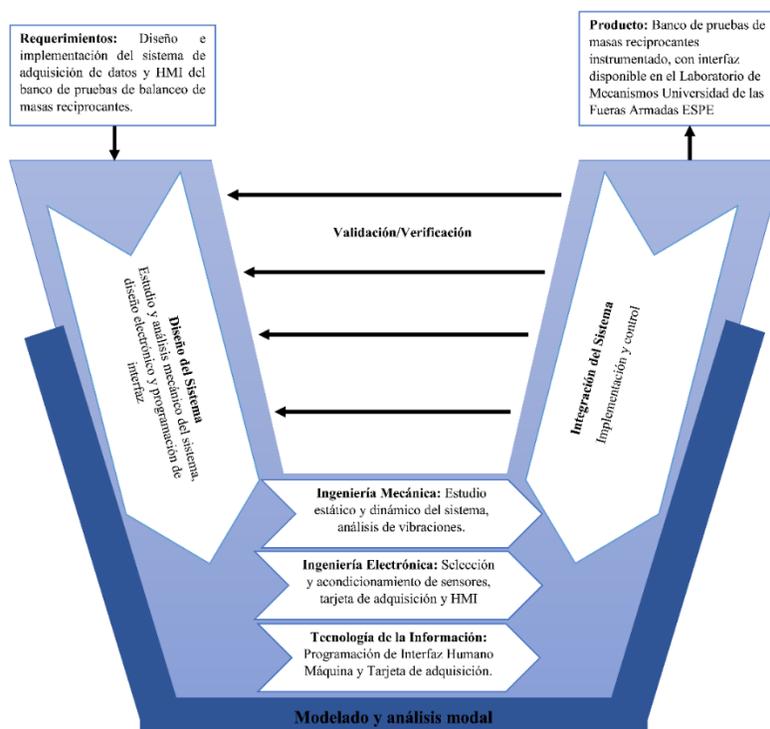
La verificación se realiza de forma continua para identificar las subfunciones del sistema y el estado de su integración, además de comprobar el cumplimiento de los requisitos y el progreso general del proyecto.

Modelado y análisis del modelo

Las actividades de diseño a nivel sistema y detalle se realizan mediante modelos, herramientas y software asistido por computador con la finalidad de obtener estimaciones, simulaciones y análisis previo del funcionamiento del sistema.

Figura 20

Modelo "V" de la norma VDI para la metodología del proyecto



Identificación de Requerimientos

La Universidad de las Fuerzas Armadas durante la formación de profesionales en ingeniería requiere laboratorios y equipos didácticos que permitan comprender y aplicar los conocimientos teóricos adquiridos; existen equipos de laboratorio con varios años de funcionamiento, que se han deteriorado o dañado componentes, en este caso el Banco de pruebas de Balanceo de Masa Reciprocantes, no cuenta con la instrumentación necesaria para adquirir y mostrar las señales de fuerzas y momentos de sacudimientos. El Ing. Luis Echeverría y el Ing. Fernando Olmedo plantearon el tema de tesis para diseñar y construir un sistema de adquisición de datos con una interfaz HMI industrial que permita a los estudiantes de ingeniería mecánica y mecatrónica usar este equipo y aplicar los conocimientos adquiridos en las asignaturas de mecanismos y vibraciones. En base al estado del equipo previo al desarrollo de

este proyecto, el estado del arte revisado y los requerimientos de los ingenieros a cargo del equipo se identificaron los requerimientos detallados en la Tabla 3 ,

Tabla 3

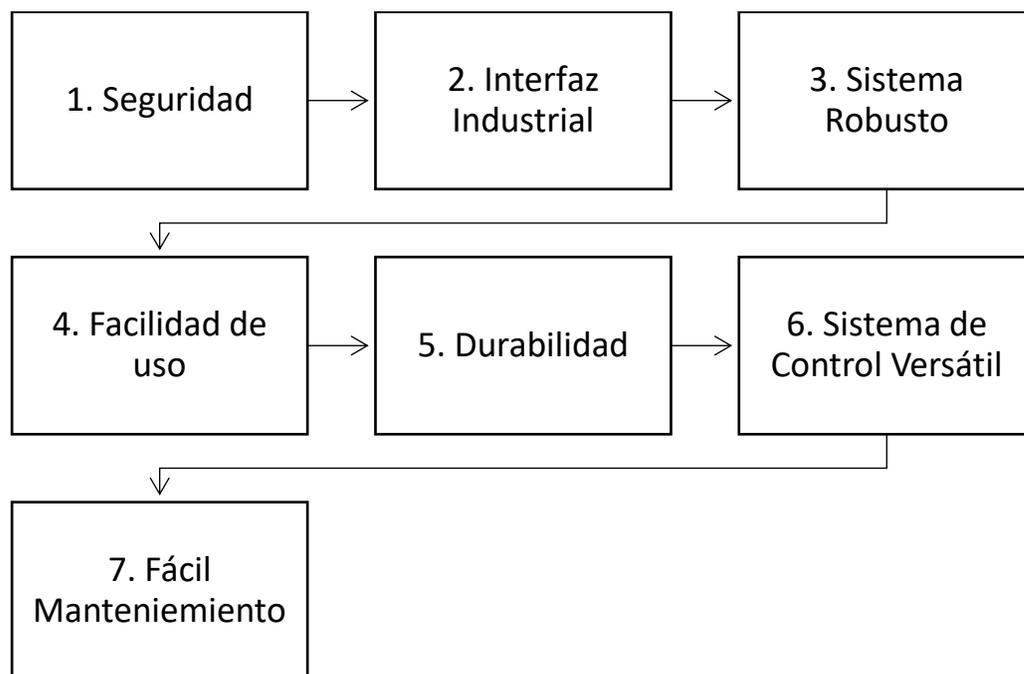
Explicación de requerimientos con la investigación previa

Requerimiento	Explicación
Interfaz Industrial	El sistema de adquisición de datos debe usar elementos industriales disponibles en el laboratorio, el PLC Xinje XC3-32R-E y la HMI Xinje TouchWin TG865-ET que permitan disminuir el costo del proyecto y garantizar una interfaz industrial permitiendo a los estudiantes el uso y manipulación de HMI, luces piloto y pulsadores.
Facilidad de uso	La interfaz debe ser intuitiva, el estudiante debe comprender el funcionamiento general del banco de pruebas de masas reciprocantes y de la interfaz.
Sistema robusto	El sistema debe garantizar su correcto funcionamiento, y permitir realizar variaciones en la interfaz, entradas y salidas del controlador para el desarrollo y control de nuevos proyectos a futuro.
Seguridad	El sistema debe garantizar la seguridad de los usuarios, estudiantes y docentes durante el funcionamiento del banco de pruebas de masas reciprocantes. Al existir elementos móviles que pueden producir atrapamientos, el equipo debe contar con las protecciones necesarias para su operación segura.
Durabilidad	El sistema de adquisición de datos debe contar con elementos electrónicos y de control que garanticen su uso y manipulación por un periodo de tiempo prolongado.
Fácil mantenimiento	El laboratorio de Mecanismo y vibraciones cuenta con varios equipos de laboratorio, las actividades de mantenimiento deben ser sencillas y garantizar la operación del equipo con frecuencias prolongadas.
Sistema de Control Versátil	En el laboratorio de mecanismo y vibraciones hay equipo con características similares que no cuentan con sistemas de adquisición de datos y de visualización, el proyecto debe permitir la conexión y ampliación del sistema para ser usado con otros equipos.

Estos requerimientos identificados son ordenados de acuerdo a su importancia de mayor a menor en la Figura 21.

Figura 21

Requerimientos del proyecto ordenados



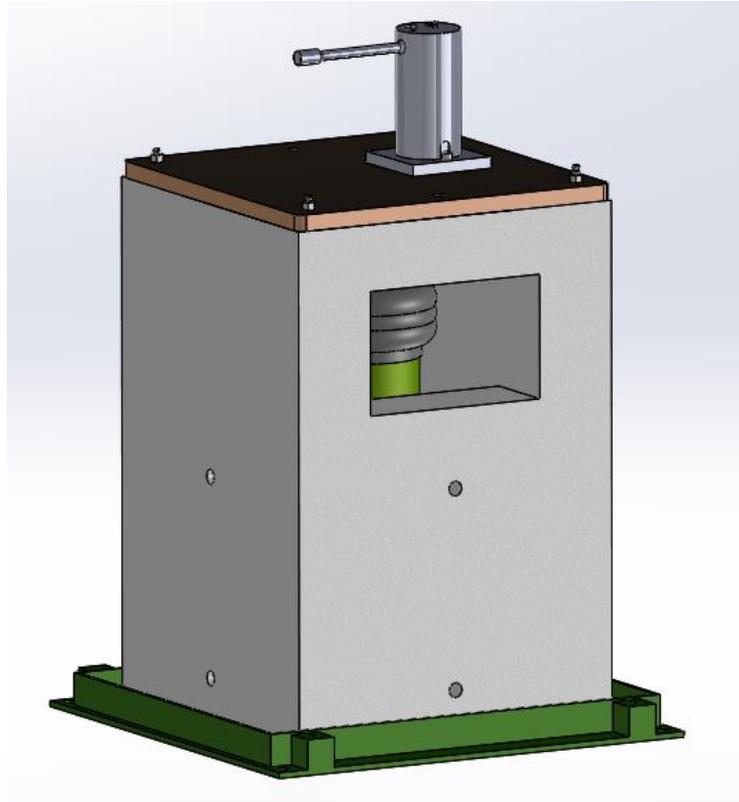
En base a los requerimientos y a los antecedentes previos se realiza una matriz de Despliegue de la función calidad QFD, para determinar las características específicas del proyecto.

Modelado CAD y descripción de componentes mecánicos del bastidor

La máquina cuenta con una base de sujeción con frecuencia natural baja, para soportar las vibraciones y fuerzas generadas durante su operación, está constituida por una base metálica para ser sujeta directamente al suelo, sobre esta base se asienta una estructura de concreto hueca, en su interior se encuentra un sistema de amortiguación conformado por un tubo inferior que se apoya en el piso, un amortiguador de caucho y el tubo superior está sujeto a la placa de acero que soporta a la columna donde se sujetará las diferentes configuraciones de prototipo de máquinas reciprocantes.

Figura 22

Bastidor del sistema de balanceo de masas reciprocantes



Los elementos que soportan a las diferentes configuraciones del prototipo de motores de combustión interna están conformados por un eje macizo que sujeta a la barra de torsión en voladizo, las dimensiones de esta barra en voladizo, son importantes para determinar la magnitud de la fuerza generada por la vibración debido a la dinámica de masas reciprocantes.

Figura 23

Base de sujeción de prototipos de motor recíprocante

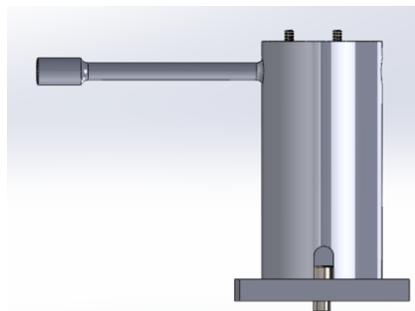
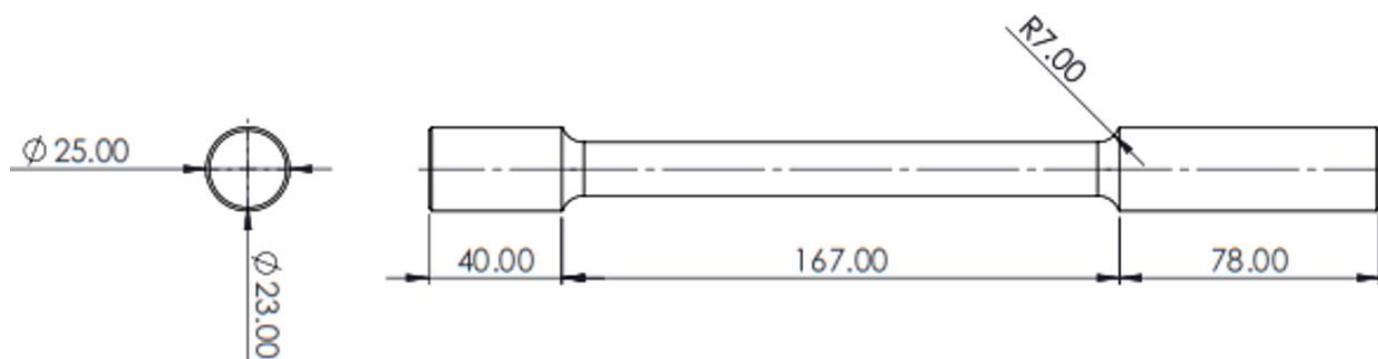


Figura 24

Dimensiones de la barra en voladizo del bastidor



Características de motor Eléctrico y control analógico

Las diferentes configuraciones son accionadas por un solo motor eléctrico que acciona a los cigüeñales a través de una polea, se sujeta al prototipo mediante una placa de acero y transmite el movimiento a través de poleas obteniendo una velocidad reducida en el cigüeñal del motor, un motor de potencia fraccionaria, es decir, su potencia mecánica de salida corresponde a una fracción de caballo de fuerza, sus características se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4

Características motor eléctrico

Marca	Fracmo
Nro. De Serie	K1715/1
Voltaje	110[V] DC
Corriente	3.0 [A]
Potencia	0.25 hp 187 W
Clase de aislamiento	E
RPM	6000
Bobinado	Continuo

Controlador de velocidad analógico del motor

El motor se controla mediante una consola analógica, esta cuenta con un dial de 0-100 que permite variar el voltaje de alimentación del motor obteniendo una velocidad proporcional, la velocidad máxima al 100% de configuración es de 6000 RPMs , además cuenta con dos fusibleras para fusibles cilíndricos de tubo de vidrio, de 2 y 1 A que protegen a la armadura del bobinado y al bobinado respectivamente, contra cortocircuitos. Además, cuenta con una luz LED indicadora y un switch de encendido del motor. En el interior de esta consola existe un transformador y un rectificador que permite obtener 110 [V] DC a partir de su alimentación de 110 [V] AC.

Figura 25

Controlador de velocidad analógico del motor

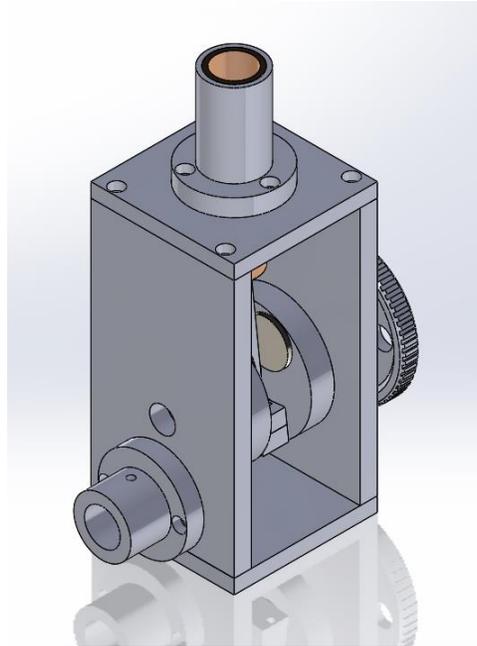


Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración Mono cilindro

La configuración mono cilindro del sistema corresponde al prototipo de un motor de combustión interna de un solo cilindro, el sistema consta de su estructura principal que soporta los elementos del mecanismo biela manivela construido en acero, cuyo émbolo se desliza en un cilindro con bocín de bronce.

Figura 26

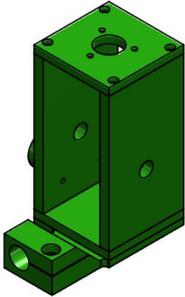
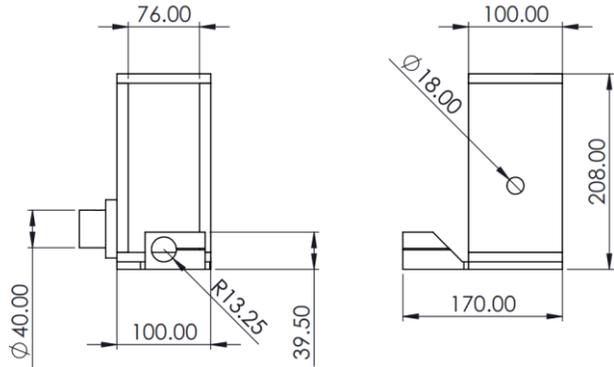
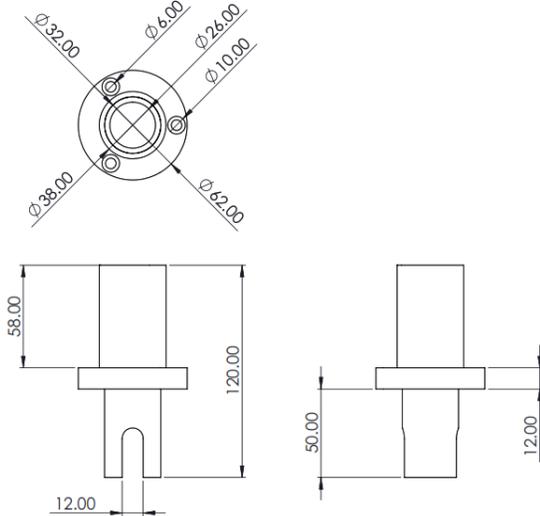
Modelo CAD de la configuración Mono cilindro



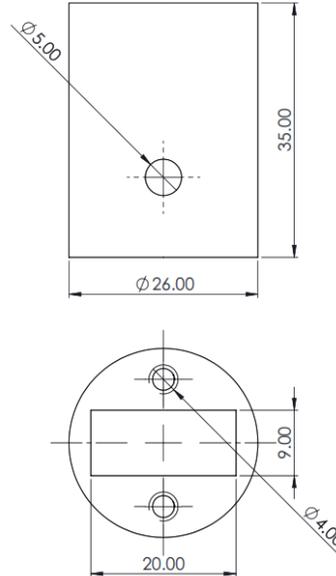
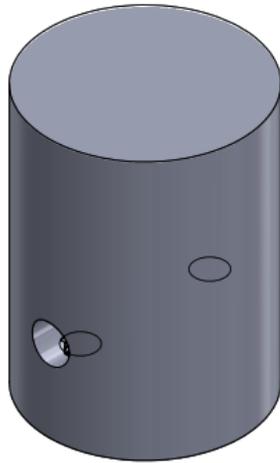
Para el análisis dinámico de la configuración del motor monocilindro y estudio de la magnitud y variación de las fuerzas de sacudimiento en el mecanismo biela manivela y las formas de balanceo se debe realizar un modelo dinámicamente equivalente, para ello se describe de forma análoga las características de los componentes del prototipo monocilindro con el eslabonamiento biela manivela en la Tabla 5.

Tabla 5

Características del prototipo en configuración Biela Manivela

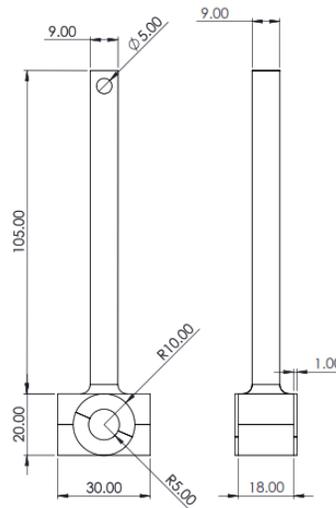
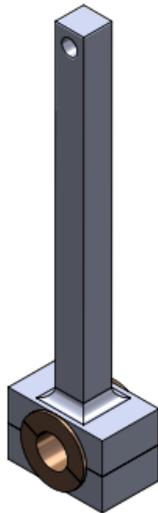
Parte	Modelo 3D	Dimensiones	Descripción
Bastidor			Soporta los elementos del eslabonamiento biela manivela, además de la polea que transmisión con el motor, y se sujeta a la barra de torsión, para transmitir los momentos y fuerzas de sacudimiento.
Cilindro			Esta formado de dos cilindros, el cilindro de acero se sujeta al bastidor y el cilindro de bronce permite el deslizamiento del pistón en su interior

Émbolo



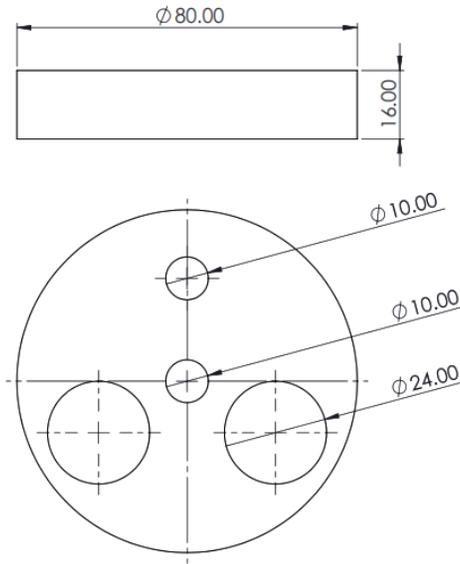
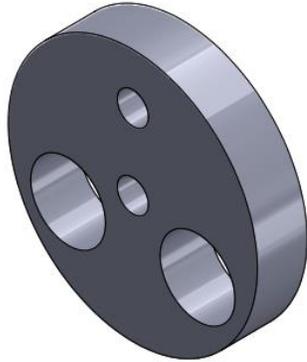
El émbolo o pistón corresponde a un cilindro con una canal en su interior con un agujero pasante donde se articula y se junta con la biela.

Biela



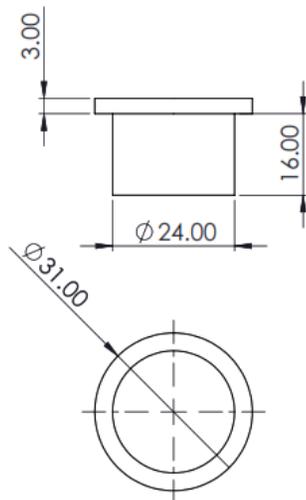
La biela está formada por dos partes unidas mediante pernos, para el pasador de la articulación con la manivela cuenta con un bocín de bronce.

Manivela



La manivela transmite el movimiento de la polea a los demás eslabones del mecanismo, es un disco con agujeros donde se podrán situar los pesos para el balanceo del mecanismo

Contrapeso



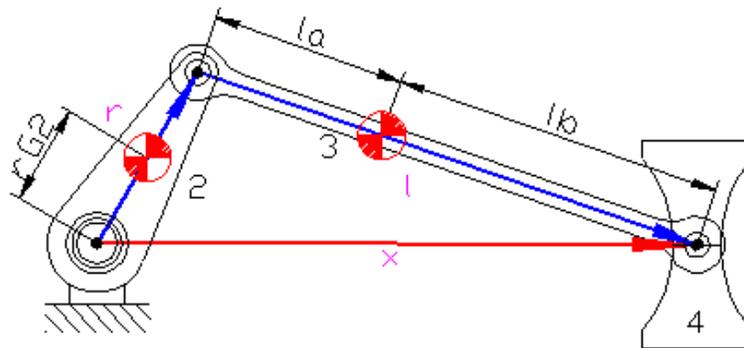
Los contrapesos del mecanismo son cilindros que se insertan en la manivela o cigüeñal para balancear el mecanismo.

Modelo Dinámicamente equivalente del mecanismo biela-manivela

Considerando que el eslabonamiento está constituido por cuatro eslabones, con sus respectivos centros de masa, se debe descomponer cada uno de los eslabones de forma conveniente para obtener las fuerzas de sacudimiento producto de su movimiento recíprocante.

Figura 27

Diagrama del mecanismo biela manivela



Considerando la biela como un solo cuerpo con su centro de gravedad, y masa debemos conservar la ubicación del centro de gravedad y obtener un eslabón con dos masas concentradas en los extremos, específicamente en el centro del pasador o bulón de la manivela o cigüeñal y en el centro del bulón del pistón; para ello debemos cumplir con las siguientes expresiones:

Se debe conservar la magnitud de la masa del eslabón original

$$m_{3a} + m_{3b} = m_3$$

Se debe conservar la ubicación del centro de gravedad del eslabón original

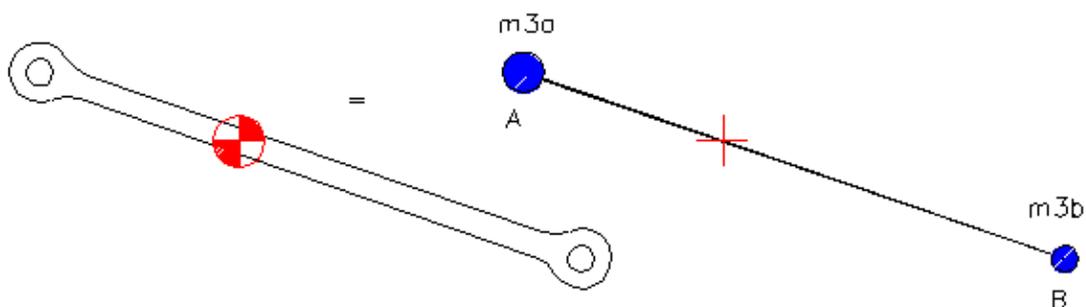
$$m_{3a}(l_a) = m_{3b}(l_b)$$

Se debe conservar la magnitud del momento de inercia del eslabón original.

$$m_{3a}(l_a)^2 + m_{3b}(l_b)^2 = I_{G3}$$

Figura 28

Modelo dinámicamente equivalente de la biela



Resolviendo se obtiene

$$l_a + l_b = l$$

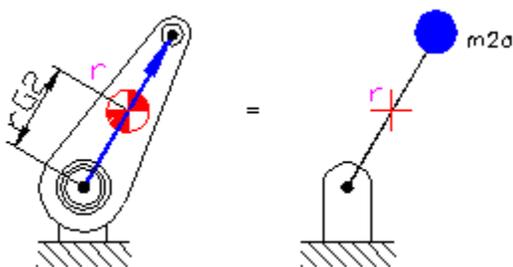
$$m_{3a} = m_3 \frac{l_b}{l}$$

$$m_{3b} = m_3 \frac{l_a}{l}$$

Para el caso de la manivela se debe obtener el modelo estáticamente equivalente del eslabón, para ello se debe concentrar la masa en el extremo de la articulación con la biela, conservando el desbalance rotacional del eslabón original:

Figura 29

Modelo dinámicamente equivalente de la manivela



$$m_2 * r_{G2} = m_{2a} * r$$

$$m_{2a} = m_2 \frac{r_G^2}{r}$$

Obteniendo un modelo dinámico compuesto por una masa giratorio con un radio r , generando una fuerza centrífuga igual a:

$$m_a = m_{2a} + m_{3a}$$

Y una masa reciprocante produciendo una fuerza inercial igual a:

$$m_b = m_{3b} + m_4$$

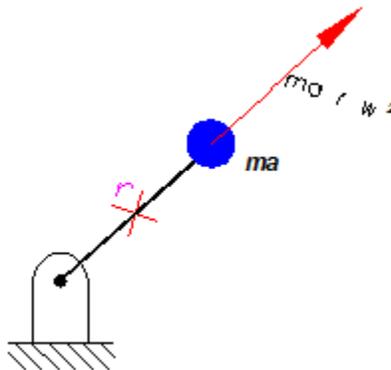
A partir de este modelo dinámicamente equivalente se puede realizar el análisis

Fuerza centrífuga producida por la masa m_a es:

$$F_{i_a} = m_a r \omega^2 (e^{i\omega t})$$

Figura 30

Fuerza centrífuga producida por m_a

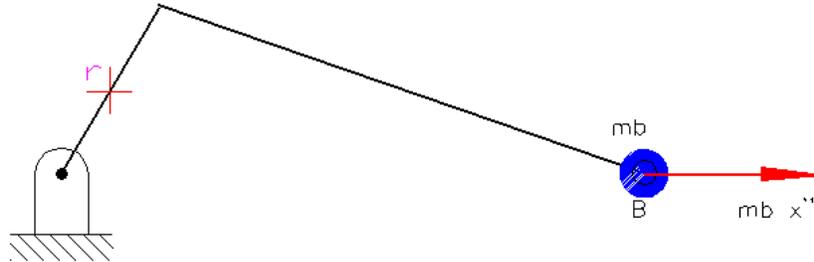


La fuerza de inercia generada por las masas reciprocantes m_b son:

$$F_{i_b} = -m_b \ddot{x}$$

Figura 31

Fuerza inercial producida por las masas reciprocantes m_b



Previamente en el análisis del mecanismo biela manivela se obtuvo que la aceleración del pistón \ddot{x} , está dado por la expresión:

$$x(t) = l - \frac{r^2}{4l} + r[\cos(\omega t) + \frac{r}{4l} \cos(2\omega t)]$$

$$v(t) = -r\omega \sin(\omega t) + \frac{r}{2l} \sin(2\omega t)$$

$$\ddot{x} = a(t) = -r\omega^2 [\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t)]$$

La fuerza inercial total se expresa:

$$F_i = F_{i_a} + F_{i_b} = m_a r \omega^2 (e^{i\omega t}) + \left\{ -m_b \left[-r\omega^2 [\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t)] \right] \right\}$$

La fuerza de sacudimiento es la suma de todas las fuerzas que actúan en el plano fijo y es igual a la fuerza opuesta de la suma de fuerzas inerciales, expresada en los ejes del plano fijo se obtiene:

$$F_s x(t) = -m_a r \omega^2 \cos(\omega t) + m_b \left[-r\omega^2 [\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t)] \right]$$

$$F_s y(t) = -m_a r \omega^2 \sin(\omega t)$$

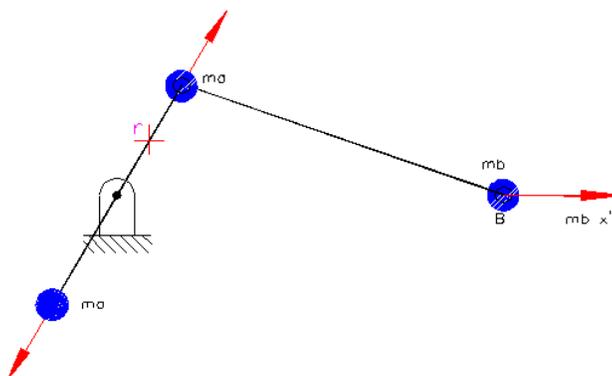
Si la suma de estas fuerzas es diferente a cero el caso corresponde a un sistema desbalanceado.

Balanceo del sistema biela manivela del motor mono cilindro

Para obtener un sistema balanceado, se debe buscar que la suma de fuerzas resultantes de sacudimiento sean cero, existen diferentes formas de balancear un sistema dinámico de masas reciprocantes, la más sencilla es colocar una masa de contrapeso m_a en la manivela o cigüeñal, este peso extra debe cancelar la fuerza centrífuga, este contrapeso se sitúa en dirección contraria a la masa original m_a , concentrada a un radio r del centro de giro

Figura 32

Diagrama de fuerzas del mecanismo biela manivela balanceado



De esta manera se obtiene la siguiente expresión:

$$F_s x_e(t) = -m_a r \omega^2 \cos(\omega t) + m_b \left[-r \omega^2 [\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t)] \right] + m_a r \omega^2 \cos(\omega t) + m_b$$

$$F_s y_e(t) = -m_a r \omega^2 \sin(\omega t) + m_a r \omega^2 \sin(\omega t) = 0$$

Si consideramos al cigüeñal como sistema individual ahora se encuentra desbalanceado.

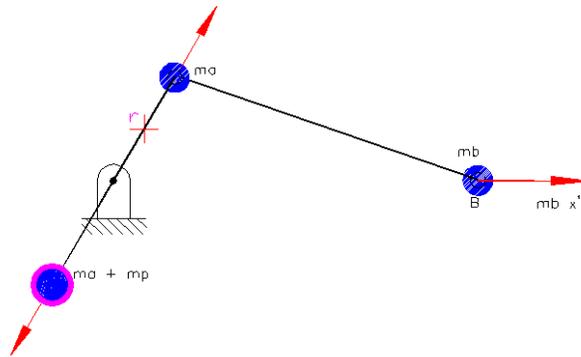
Existe un tercer caso de estudio en el balanceo de un sistema dinámico, añadiendo una masa m_p en la misma ubicación de m_a , esta masa depende del valor de la masa m_b dependiendo de las condiciones de operación y montaje del sistema, en el caso de posición del cilindro vertical lo recomendable es $2/3$ de m_b , obtenemos la suma de fuerzas de sacudimiento de la siguiente manera:

$$F_s x_s(t) = -0.6 m_b r \omega^2 \cos(\omega t) + m_b \left[-r \omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right] \right]$$

$$F_s y_e(t) = -0.6 m_b r \omega^2 \sin(\omega t)$$

Figura 33

Diagrama de fuerzas de mecanismo biela manivela sobreequilibrado



Esto permite obtener una reducción en las fuerzas de sacudimiento en x y dependiendo del valor de m_p las fuerzas en y estarían dentro de valores admisibles.

Fuerzas Transmitidas

Para nuestro caso las fuerzas de sacudimiento generadas por la dinámica del sistema de motor mono cilindro, se transmiten a la barra en voladizo que actúa como un resorte, el sistema está construido de tal manera que las fuerzas no son transmitidas al piso, estas fuerzas se pueden amplificar o disminuir dependiendo de la frecuencia de operación.

En el caso de desbalanceo las fuerzas transmitidas se expresan por la siguiente ecuación diferencial:

$$Mx'' + kx = F_s x(t) = m_a r \omega^2 \cos(\omega t) + m_b r \omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right]$$

Donde M es la masa del motor y k es la constante del resorte, es decir, de la barra en voladizo que sostiene al prototipo; resolviendo término a término

$$Mx'' + kx = m_a r \omega^2 \cos(\omega t)$$

$$x = A \cos(\omega t)$$

$$x' = -A \omega \sin(\omega t)$$

$$x'' = -A \omega^2 \cos(\omega t)$$

Encontramos la constante A:

$$M[-A \omega^2 \cos(\omega t)] + k A \cos(\omega t) = m_a r \omega^2 \cos(\omega t)$$

$$A = \frac{m_a r \omega^2}{k - M\omega^2} = \frac{\frac{m_a r \omega^2}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{\frac{k}{M}}} = \frac{\frac{m_a r \omega^2}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{\frac{k}{M}}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

$$A = \frac{\frac{m_a r \omega^2}{k}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Obtenemos:

$$x_1(t) = A \cos(\omega t) = \frac{\frac{m_a r \omega^2}{k}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \cos(\omega t)$$

Continuando con el siguiente término:

$$Mx'' + kx = m_b r \omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right]$$

$$x = B \cos(\omega t)$$

$$x' = -B \omega \sin(\omega t)$$

$$x'' = -B \omega^2 \cos(\omega t)$$

$$M[-B \omega^2 \cos(\omega t)] + k B \cos(\omega t) = m_b r \omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right]$$

$$B = m_b r \omega^2 \left[\frac{\cos(\omega t)}{k - M\omega^2} + \frac{r \cos(2\omega t)}{l(k - M\omega^2)} \right] = m_b r \omega^2 \left[\frac{\frac{\cos(\omega t)}{k}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + \frac{\frac{r \cos(2\omega t)}{lk}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]$$

$$x_2(t) = B \cos(\omega t) = m_b \frac{r\omega^2}{k} \left[\frac{\cos(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + \frac{r}{l} \frac{\cos(2\omega t)}{1 - \left(2\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]$$

La expresión de la fuerza transmitida es:

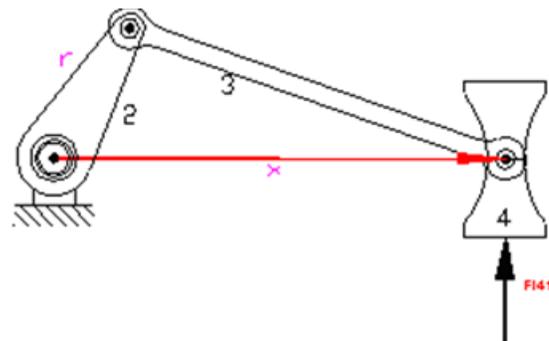
$$F_{trxd}(t) = m_a r \omega^2 \frac{\cos(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + m_b r \omega^2 \left[\frac{\cos(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + \frac{r}{l} \frac{\cos(2\omega t)}{1 - \left(2\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]$$

Torque de sacudimiento

El torque de inercia del mecanismo monocilindro es resultado de la componente vertical de la fuerza de inercia del pistón considerando el brazo de momentos, este torque de inercia no contribuye al par de torsión de impulsión neta, es decir que su magnitud es un momento parásito que crea oscilaciones que producen vibraciones no deseadas.

Figura 34

Brazo y fuerza normal de Torque de Sacudimiento Monocilindro



El torque resulta a la fuerza normal por el brazo, en este caso el brazo corresponde a la posición del pistón, la expresión es:

$$T_i(t) = Fi_{41} * x(t)$$

Considerando la numeración y desplazamiento de los eslabones mostrados en la Figura 34. La fuerza normal y el torque de sacudimiento se definen de la siguiente manera:

$$F_{i_{41}} = m_b * x''(t) \tan(\phi)$$

$$T_i(t) = m_b * x''(t) \tan(\phi) * x(t)$$

Conociendo que la velocidad y aceleración del pistón son:

$$x'(t) = 1 - \frac{r^2}{4l} + r \left(\cos(\omega t) + \frac{r}{4l} \cos(2\omega t) \right)$$

$$x''(t) = -r * \omega^2 \left(\cos(\omega t) + \frac{r}{l} \cos(2\omega t) \right)$$

Aplicando identidades trigonométricas se obtiene:

$$\tan(\phi) = \frac{r}{l} \sin(\omega t) \left(1 + \frac{r^2}{2l^2} \sin^2(\omega t) \right)$$

Finalmente se obtiene la expresión de torque de sacudimiento:

$$T_s(t) = \frac{m_b r^2}{2} \omega^2 \left(\frac{r}{2l} \sin(\omega t) - \sin(2\omega t) - \frac{3r}{2l} \sin(3\omega t) \right)$$

Momentos Transmitidos

Para nuestro caso las fuerzas de sacudimiento generadas por la dinámica del sistema de motor mono cilindro, se transmiten a la barra en voladizo que actúa como un resorte, el sistema está construido de tal manera que las fuerzas no son transmitidas al piso, estas fuerzas se pueden amplificar o disminuir dependiendo de la frecuencia de operación.

Para obtener el torque transmitido se debe resolver la ecuación diferencial:

$$I * \theta'' + k_t * \theta = T_s(t) = \frac{m_b r^2}{2} * \omega^2 \left(\frac{r}{2l} * \sin(\omega t) - \sin(2\omega t) - \frac{3r}{2l} (\sin 3\omega t) \right)$$

El sistema se comporta como un cuerpo con movimiento giratorio con desplazamiento angular θ , donde el momento polar de inercia I se opone al movimiento, además la constante elástica torsional k_t que corresponde al esfuerzo de torsión necesario para girar a un resorte o en este caso a la barra de torsión en voladizo un ángulo de 1 rad.

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene:

$$T_t(t) = \frac{m_b r^2}{2} \omega^2 \left(\frac{r}{2l} * \frac{\sin(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nt}}\right)^2} - \frac{\sin(2\omega t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{\omega_{nt}}\right)^2} - \frac{3r}{2l} * \frac{\sin(3\omega t)}{1 - \left(\frac{3\omega}{\omega_{nt}}\right)^2} \right)$$

Donde la frecuencia natural es:

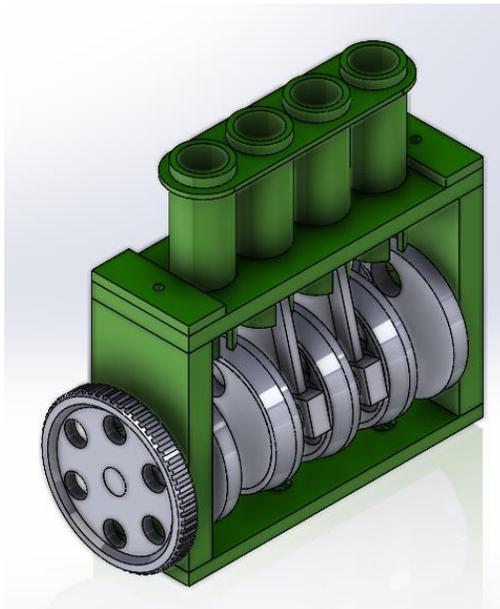
$$\omega_{nt} = \sqrt{\frac{k_t}{I_p}}$$

Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración de Cuatro cilindros en línea

La máquina cuenta con el prototipo de un motor de cuatro cilindros en línea, permitiendo configurar diferentes ángulos de fase en el cigüeñal, generando diferentes fuerzas y torques de sacudimiento transmitidos dependiendo de los ángulos de fase y comprobando la teoría de balanceo del sistema. El prototipo está construido en acero, el ensamble completo se muestra en la Figura 35.

Figura 35

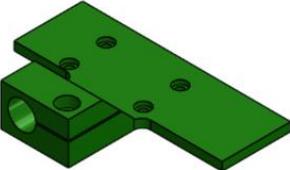
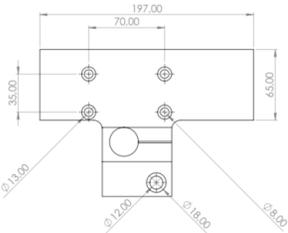
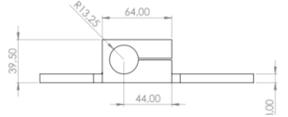
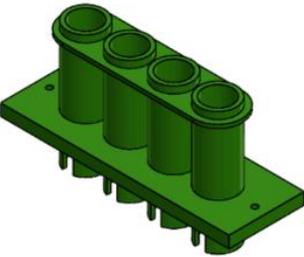
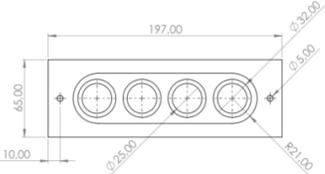
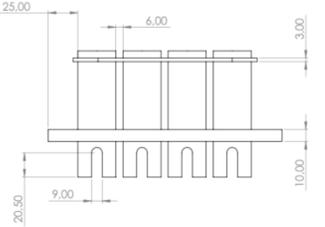
Modelo CAD de la configuración de cuatro cilindros en V



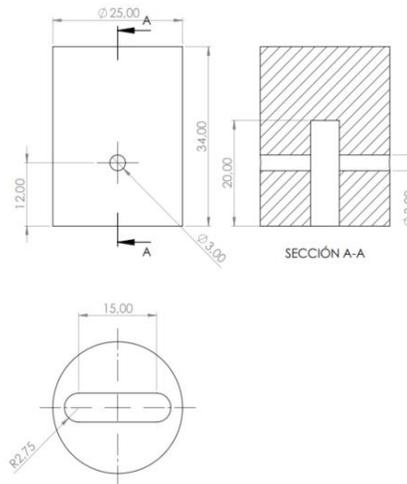
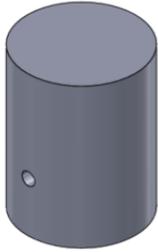
Para el análisis dinámico del prototipo de motor de cuatro cilindros en V se describen cada uno de los componentes del sistema en la Tabla 6.

Tabla 6

Características del prototipo de motor de 4 cilindros en línea

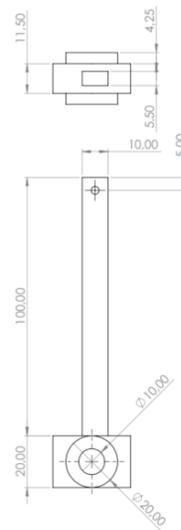
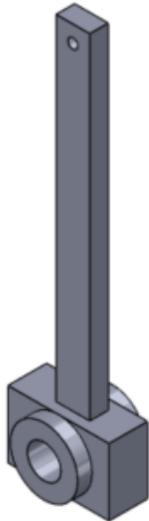
Parte	Modelo 3D	Dimensiones	Descripción
Bastidor		  	<p>Soporta los demás componentes del prototipo y se acopla con la barra en voladizo del bastidor general de la máquina.</p>
Cilindros		  	<p>Los cilindros están contruidos en un solo cuerpo, en el interior del cilindro de acero se encuentra un bocín de bronce que permite el deslizamiento del émbolo.</p>

Émbolo



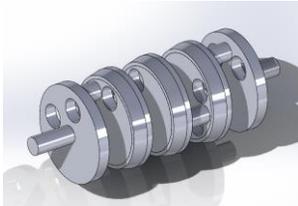
El émbolo o pistón es un cilindro con una canal en su parte inferior y un pasador para articularse con la biela.

Bielas



La biela está formada por dos partes unidas mediante pernos, para el pasador de la articulación con la manivela cuenta con un bocín de bronce.

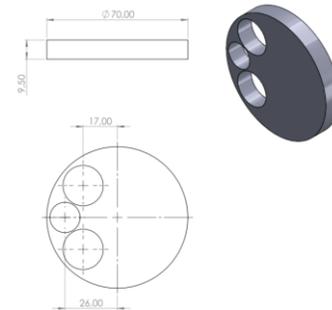
Cigüeñal



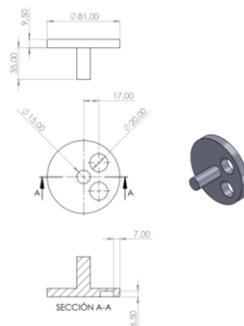
Rueda Variable Exterior



Rueda Variable interior



Rueda no variable



El cigüeñal del prototipo se compone de diferentes elementos que permiten modificar los ángulos de fase entre cilindros, para ello se ensamblan diferentes ruedas desplazables una con respecto a la otra.

Rueda Variable exterior

Permite que exista un desplazamiento angular con respecto a la rueda variable que se aloja en su interior, en su cara externa cuenta graduación para observar el ángulo de desfase con respecto a la rueda previa. Para fijar las ruedas se ajusta un prisiones.

Rueda variable interior

Tiene tres agujeros, dos para añadir peso en el balanceo del sistema, y otro para el pasador.

Rueda no variable

Conecta el eje de la polea motriz, y está apoyada en los rodamientos del bastidor.

Diagrama de fase de la manivela

La disposición de los codos del cigüeñal, es muy importante en la dinámica del motor multicilíndrico, especialmente en la generación de fuerzas de sacudimiento, en el motor de cuatro cilindros el desfase apropiado debe satisfacer la relación entre un periodo de una revolución y el número de cilindros:

$$\phi = \frac{360^\circ}{n}$$

Donde n es el número de cilindros, además se debe realizar las siguientes consideraciones para medir los ángulos de fase:

- El primer cilindro será el número 1, y será la referencia angular inicial para los demás cilindros, es decir, el ángulo será siempre cero.
- Los cilindros se enumeran consecutivamente de frente hacia atrás del motor.
- Los ángulos de fase se miden internamente con respecto al cigüeñal, con relación al sistema coordenado del primer codo del cigüeñal.

Fuerzas de Sacudimiento en motores en línea

Para determinar las fuerzas de sacudimiento de un motor la línea, se debe considerar que cada cilindro contribuye de manera individual a la fuerza de sacudimiento resultante.

$$F_{sx}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[(\cos(\omega * t)) + \frac{r}{l} * \cos(2 * \omega * t) \right]$$

$$F_{st}(t) = 0$$

Fuerza resultante monocilindro

Suponiendo que todos los cilindros tienen el mismo desplazamiento, y que los pistones y bielas tienen las mismas dimensiones, la expresión de la fuerza resultante considerando las masas de las bielas:

$$F_{sx}(t) = \sum_{i=1}^n m_b * r * \omega^2 \left[(\cos(\omega * t - \phi_i)) + \frac{r}{l} * \cos(2(\omega * t - \phi_i)) \right]$$

$$F_{st}(t) = 0$$

Usando identidades trigonométricas obtenemos la expresión:

$$F_{sx}(t) = m_b * r * \omega^2 \sum_{i=1}^n \left[\begin{array}{l} (\cos(\omega * t) * \cos(\phi_i) + \text{sen}(\omega * t) * \text{sen}(\phi_i)) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) * \cos(2\phi_i) + \text{sen}(2\omega * t) * \text{sen}(2\phi_i)) \end{array} \right]$$

Para proteger los elementos dinámicos de la bancada del motor lo ideal es obtener fuerzas de sacudimiento nulas, para ello se debe cumplir:

$$\sum_{i=1}^n \cos(\phi_i) = 0 \quad \sum_{i=1}^n \text{sen}(\phi_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \cos(2\phi_i) = 0 \quad \sum_{i=1}^n \text{sen}(2\phi_i) = 0$$

El motor estudiado tiene cuatro cilindros, debemos resolver le sistema de ecuaciones:

$$\cos(\phi_1) + \cos(\phi_2) + \cos(\phi_3) + \cos(\phi_4) = 0$$

$$\cos(2\phi_1) + \cos(2\phi_2) + \cos(2\phi_3) + \cos(2\phi_4) = 0$$

$$\text{sen}(\phi_1) + \text{sen}(\phi_2) + \text{sen}(\phi_3) + \text{sen}(\phi_4) = 0$$

$$\text{sen}(2\phi_1) + \text{sen}(2\phi_2) + \text{sen}(2\phi_3) + \text{sen}(2\phi_4) = 0$$

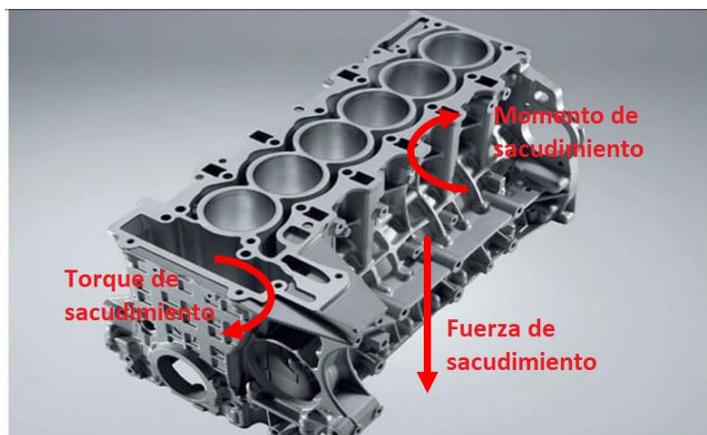
Resolviendo este sistema obtenemos que los ángulos son: 0°, 90°, 180°, 270°.

Momentos de Sacudimiento en motores en línea

El motor multicilíndrico es un cuerpo tridimensional, por consiguiente a pesar que las fuerzas de sacudimiento estén canceladas, se pueden producir momentos de sacudimiento en el plano del bloque del motor, siendo necesario realizar el balanceo dinámico del sistema.

Figura 36

Dinámica de motor multicilíndrico en línea



Nota. Adaptado de *El bloque del motor*, por Prueba de ruta, 2022,

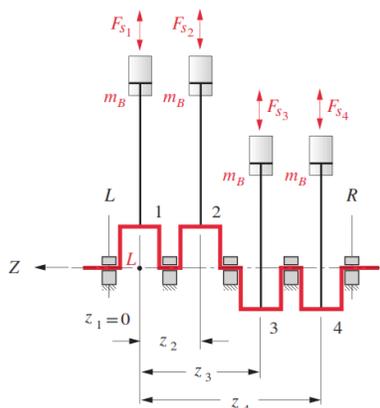
(<https://www.pruebaderuta.com/el-bloque-del-motor.php>)

En nuestro caso el motor en línea cuenta con cuatro cilindros, el diagrama de fuerzas y distancias que generan los momentos de sacudimiento se muestra en Figura 37

Diagrama de momentos de sacudimiento motor multicilíndrico Figura 37.

Figura 37

Diagrama de momentos de sacudimiento motor multicilíndrico



Nota. Tomado de *Moment arms of the shaking moment*, por Norton, Robert L., 2020.

$$\sum M_L = \sum_{i=1}^n z_i * F s_i$$

$$M_s(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} \cos(\omega t) \sum_{i=1}^n z_i * \cos(\phi_i) + \sin(\omega t) \sum_{i=1}^n z_i * \sin(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * \left(\cos(\omega t) \sum_{i=1}^n z_i * \cos(2\phi_i) + \sin(2\omega t) \sum_{i=1}^n z_i * \sin(2\phi_i) \right) \end{array} \right]$$

Resolviendo el momento de sacudimiento igual a cero se obtiene, para todo valor de $\omega * t$

si:

$$\sum_{i=1}^n z_i * \cos(\phi_i) = 0 \quad \sum_{i=1}^n z_i * \sin(\phi_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n z_i * \cos(2\phi_i) = 0 \quad \sum_{i=1}^n z_i * \sin(2\phi_i) = 0$$

El momento de sacudimiento tiene como consecuencia un movimiento de cabeceo en el motor hacia adelante y atrás, resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$z_1 = 0; z_2 = 1; z_3 = 2; z_4 = 3$$

$$z_1 * \cos(\phi_1) + z_2 * \cos(\phi_2) + z_3 * \cos(\phi_3) + z_4 * \cos(\phi_4) = 0$$

$$z_1 * \cos(2\phi_1) + z_2 * \cos(2\phi_2) + z_3 * \cos(2\phi_3) + z_4 * \cos(2\phi_4) = 0$$

$$z_1 * \sin(\phi_1) + z_2 * \sin(\phi_2) + z_3 * \sin(\phi_3) + z_4 * \sin(\phi_4) = 0$$

$$z_1 * \sin(2\phi_1) + z_2 * \sin(2\phi_2) + z_3 * \sin(2\phi_3) + z_4 * \sin(2\phi_4) = 0$$

Se obtiene como resultado los ángulos de fase, siendo el esquema más utilizado ya que además de anular los momentos de sacudimiento, tiene una disposición plana facilitando su manufactura, y tienen un patrón de encendido y pulsos de potencia uniformes:

$$\phi_1 = 0; \phi_2 = 180; \phi_3 = 180; \phi_4 = 0$$

Momentos y fuerzas transmitidas

Al igual que en el caso de motor monocilindro, los momentos y fuerzas transmitidas corresponden a sistemas dinámicos que se resuelven por ecuaciones diferenciales:

Fuerzas transmitidas motores multicilíndricos en línea:

$$F_t(t) = \sum_{i=1}^n m_b * r * \omega^2 \left[\frac{\cos(\omega t - \phi_i)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nv}}\right)^2} + \frac{r}{l} * \frac{\cos(2(\omega t - \phi_i))}{1 - \left(\frac{2\omega}{\omega_{nv}}\right)^2} \right]$$

La frecuencia natural vertical es $\omega_{nv} = 980 \text{ rpm}$

Momentos de sacudimiento transmitidos motores multicilíndricos en línea:

$$M_t(t) = \sum_{i=1}^n z_i * m_b * r * \omega^2 \left[\frac{\cos(\omega t - \phi_i)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nM}}\right)^2} + \frac{r}{l} * \frac{\cos(2(\omega t - \phi_i))}{1 - \left(\frac{2\omega}{\omega_{nM}}\right)^2} \right]$$

La frecuencia natural correspondiente al momento rotatorio de sacudimiento es:

$\omega_{nM} = 1490 \text{ rpm}$.

Modelo CAD y análisis dinámico de la configuración de Cuatro cilindros en V

La máquina cuenta con el prototipo de un motor de cuatro cilindros en V, permitiendo configurar el ángulo entre la dirección de los cilindros, permitiendo generar diferentes fuerzas y torques de sacudimiento dependiendo del ángulo. El prototipo está construido en acero, el ensamble completo se muestra en la Figura 38.

Figura 38

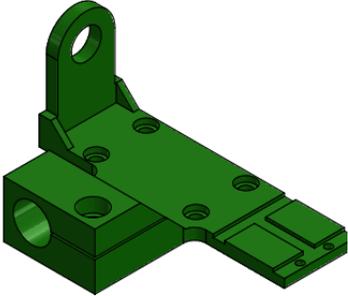
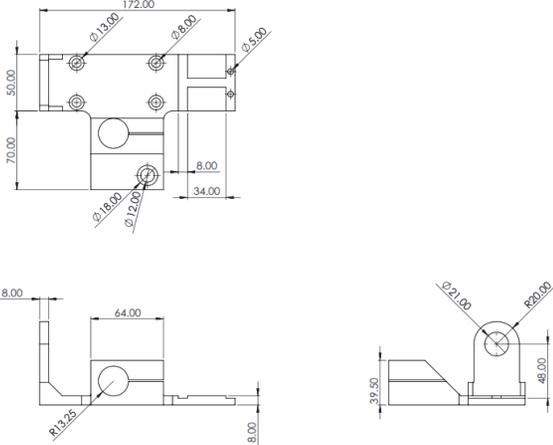
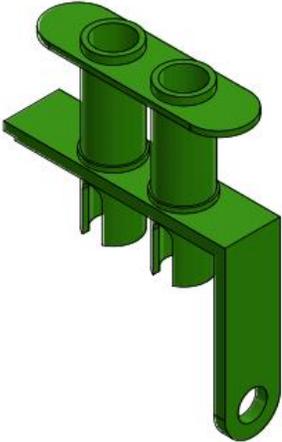
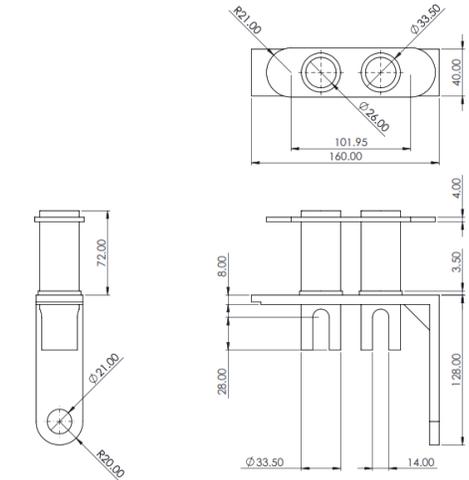
Modelo CAD de la configuración de cuatro cilindros en V



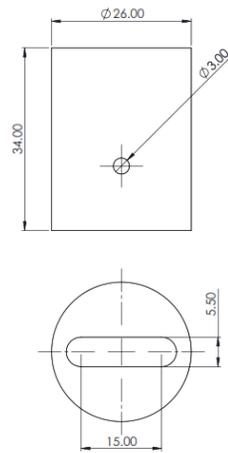
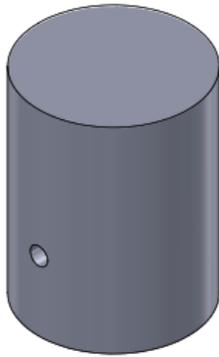
Para el análisis dinámico del prototipo de motor de cuatro cilindros en V se describen cada uno de los componentes del sistema en la Tabla 7.

Tabla 7

Características del prototipo de motor de 4 cilindros en V

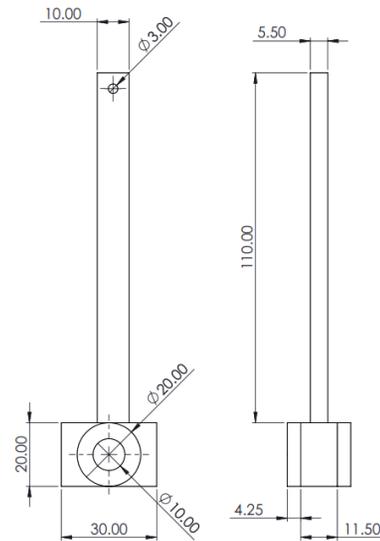
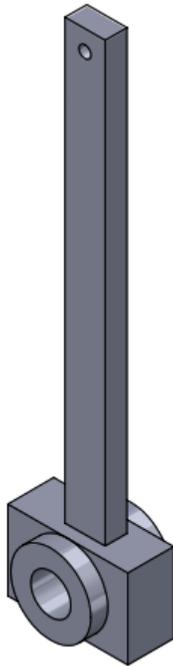
Parte	Modelo 3D	Dimensiones	Descripción
Bastidor			<p>Soporta los demás componentes del prototipo y se acopla con la barra en voladizo del bastidor general de la máquina.</p>
Cilindros			<p>Los cilindros están contruidos en un solo cuerpo, en el interior del cilindro de acero se encuentra un bocín de bronce que permite el deslizamiento del émbolo.</p>

Émbolo



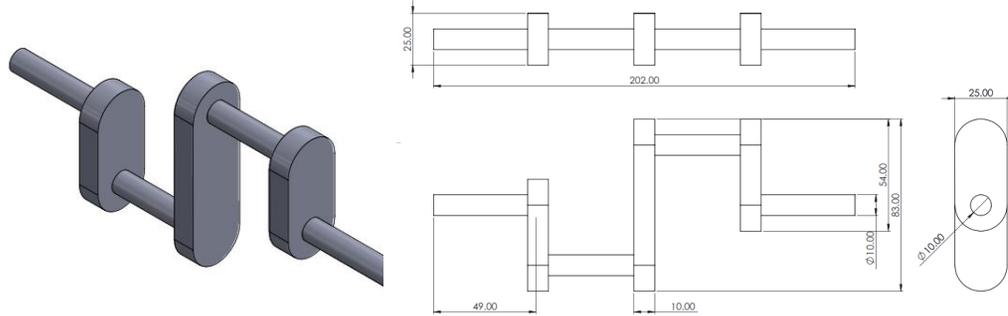
El émbolo o pistón es un cilindro con una canal en su parte inferior y un pasador para articularse con la biela.

Bielas



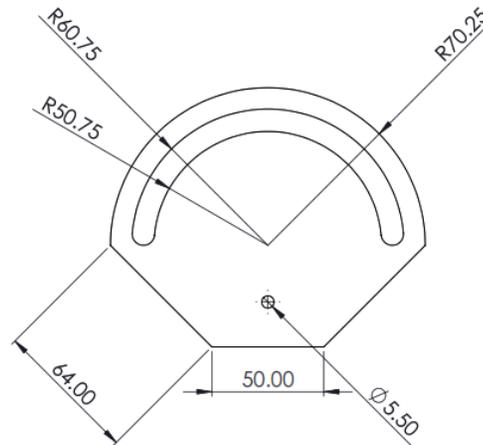
La biela está formada por dos partes unidas mediante pernos, para el pasador de la articulación con la manivela cuenta con un bocín de bronce.

Cigüeñal



El cigüeñal de los cuatro cilindros está formado por tres placas oblongas, unidas por pasadores o bulones donde se articulan las cuatro bielas del prototipo.

Goniómetro



En la parte frontal del prototipo existe una placa con un canal en el centro que permite configurar el ángulo entre cilindros del prototipo y cuenta con una regla que muestra la magnitud del ángulo con respecto a la vertical.

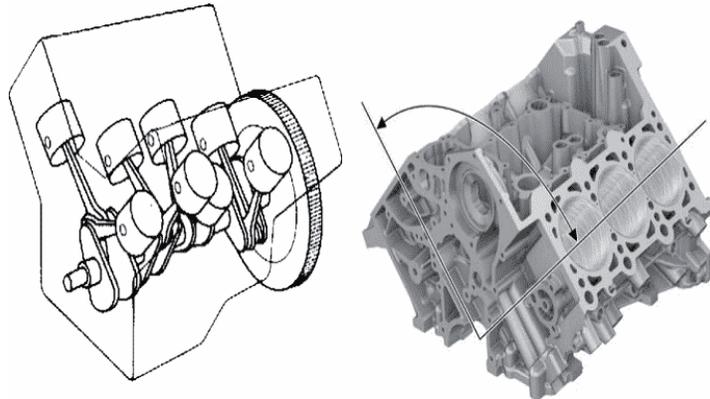
Fuerzas de Sacudimiento en motores en línea

El motor de configuración en V tiene el mismo principio de dinámico y de diseño de los motores en línea, se considera que el motor en V se conforma por dos motores en línea compartiendo el cigüeñal, es decir, cada bloque genera sus fuerzas y momentos de sacudimiento.

En este caso además de elegir la correcta configuración de ángulos de fase entre cilindros colineales, se debe elegir el ángulo de la V.

Figura 39

Ángulo de motor multicilíndrico configuración en V

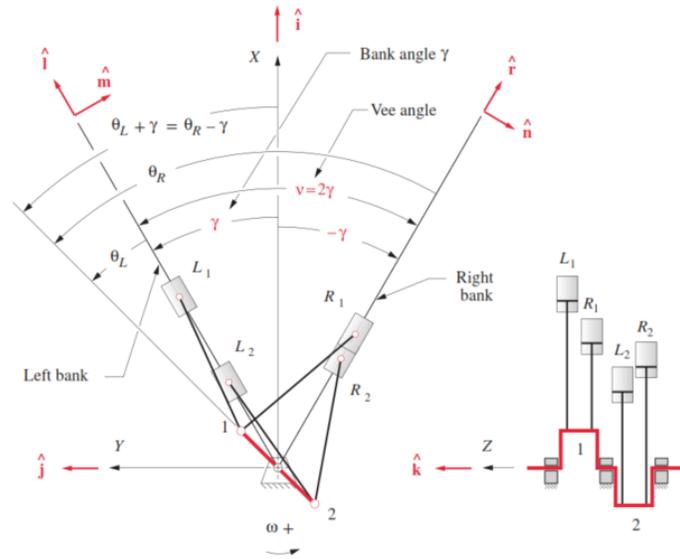


Nota. Tomado de *Tipos de motores, 6 Clasificaciones Para Entenderlos Mejor*, por Mundo Motor, 2019, (<https://www.mundodelmotor.net/tipos-de-motores/>)

El ángulo de la V en este caso se divide en dos $v = 2\gamma$, se considera un eje central x cuyo origen está en el cigüeñal del motor, el ángulo de giro o de la manivela se mide a partir de este eje; cada bloque tiene su respectiva referencia en el primer cilindro de la derecha, como se muestra en la Figura 39.

Figura 40

Geometría de motor multicilíndrico en V



Nota. Tomado de *Vee-engine geometry*, por Robert L. Norton, 2020.

Para determinar las fuerzas de sacudimiento de un motor en V se debe considerar que cada bloque tiene a un cilindro compartiendo un codo de cigüeñal, la fuerza de sacudimiento para un cilindro en la dirección del movimiento del pistón \hat{u} con θ medido con respecto al eje del pistón es:

$$F_{sx}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[(\cos(\omega * t)) + \frac{r}{l} * \cos(2 * \omega * t) \right]$$

$$F_{st}(t) = 0$$

La fuerza total de sacudimiento es la sumatoria vectorial de las fuerzas de cada bloque, considerando el ángulo de la manivela con respecto al eje X, las fuerzas de sacudimiento para el bloque derecho (R) e izquierdo (L) son:

$$F_{sR}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[(\cos(\omega * t + \gamma)) + \frac{r}{l} * \cos(2 * \omega * t + \gamma) \right] \hat{r}$$

$$F_{sL}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[(\cos(\omega * t - \gamma)) + \frac{r}{l} * \cos(2 * \omega * t - \gamma) \right] \hat{l}$$

El ángulo γ se suma o se resta del ángulo de la manivela para cada bloque, sustituyendo la expresión con identidades se obtiene:

$$F_{S_R}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} \cos(\omega * t) \cos(\gamma) - \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) - \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma)) \end{array} \right] \hat{r}$$

$$F_{S_L}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} \cos(\omega * t) \cos(\gamma) + \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) + \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma)) \end{array} \right] \hat{l}$$

Sin embargo, se debe considerar el ángulo de desfaseamiento al tener más de un cilindro en cada bloque, es decir, se debe restar el ángulo ϕ_i y expresar en términos de la sumatoria:

$$F_{S_R}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) - \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(\phi_i) \\ + (\cos(\omega * t) \text{sen}(\gamma) + \text{sen}(\omega * t) \cos(\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \cos(2\gamma) - \text{sen}(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(2\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma) + \text{sen}(2\omega * t) \cos(2\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(2\phi_i) \end{array} \right] \hat{r}$$

$$F_{S_L}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) + \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n \cos(\phi_i) \\ - (\cos(\omega * t) \text{sen}(\gamma) - \text{sen}(\omega * t) \cos(\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \cos(2\gamma) + \text{sen}(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n \cos(2\phi_i) \\ - \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma) - \text{sen}(2\omega * t) \cos(2\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n \text{sen}(2\phi_i) \end{array} \right] \hat{l}$$

De esta manera sumando vectorialmente las fuerzas de sacudimiento resultantes se obtiene:

$$F_{S_x} = (F_{S_L} + F_{S_R}) \cos(\gamma) \hat{l}$$

$$F_{S_y} = (F_{S_L} - F_{S_R})\text{sen}(\gamma)\hat{j}$$

$$F_S = F_{S_x}\hat{i} + F_{S_R}\hat{j}$$

Igualando estas ecuaciones a cero se obtiene diferentes soluciones, una particularidad de esta configuración es que una solución no depende del ángulo de fase del cigüeñal, si $\gamma=90^\circ$, la componente en X siempre será cero, además si $F_{S_L} = F_{S_R}$, la componente en Y de la fuerza resultante será cero independientemente del ángulo γ .

Momentos de Sacudimiento en motores en V

Al igual que el motor en línea se debe considerar el brazo de momento para cada término de la fuerza de sacudimiento, en este caso los momentos están presentes en cada bloque, sus vectores resultantes son ortogonales con respecto al plano de desplazamiento de los cilindros, para facilitar el cálculo se define un vector unitario para el bloque derecho \hat{n} perpendicular a \hat{r} en el plano z; para el bloque izquierdo se tiene los vectores unitarios \hat{m} perpendicular a \hat{l} , como se muestra en la Figura 40, las expresiones de los momentos son:

$$M_{S_R}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) - \text{sen}(\omega * t)\text{sen}(\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(\phi_i) \\ + (\cos(\omega * t) \text{sen}(\gamma) + \text{sen}(\omega * t)\cos(\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \cos(2\gamma) - \text{sen}(2\omega * t)\text{sen}(2\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(2\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma) + \text{sen}(2\omega * t)\cos(2\gamma)) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \text{sen}(2\phi_i) \end{array} \right] \hat{n}$$

$$MS_R(t) = m_b * r * \omega^2 \begin{bmatrix} (\cos(\omega * t) \cos(\gamma) + \text{sen}(\omega * t) \text{sen}(\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \cos(\phi_i) \\ - (\cos(\omega * t) \text{sen}(\gamma) - \text{sen}(\omega * t) \cos(\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \cos(2\gamma) + \text{sen}(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \cos(2\phi_i) \\ - \frac{r}{l} * (\cos(2\omega * t) \text{sen}(2\gamma) - \text{sen}(2\omega * t) \cos(2\gamma)) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \text{sen}(2\phi_i) \end{bmatrix} \hat{m}$$

Realizando la sumatoria se obtiene:

$$M_{s_x} = (MS_L + MS_R) \text{sen}(\gamma)$$

$$M_{s_y} = (MS_L - MS_R) \cos(\gamma)$$

$$M_s = M_{s_x} \hat{i} + M_{s_y} \hat{j}$$

Las velocidades críticas en donde se alcanza la frecuencia natural del sistema para el modelo de 4 cilindros en V, dependen del valor de los coeficientes de elasticidad de la barra de torsión, en este caso se obtiene:

$k_1 = 14046100$ Coeficiente de elasticidad para la frecuencia vertical

$k_2 = 33856525$ Coeficiente de elasticidad para la frecuencia no rotatoria.

La masa del modelo es de $m = 12.84 \text{ kg}$

La frecuencia natural para fuerzas transmitida es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1}{m}} = 1068.018 \text{ rpm}$$

La frecuencia natural para momentos transmitidos es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2}{m}} = 1623.823 \text{ rpm}$$

Momentos y fuerzas transmitidas

Son las fuerzas y momentos que se transmiten al bastidor mediante el mecanismo, en este caso estas fuerzas se transmiten a la barra en voladizo que soporta el mecanismo, donde se ubican las galgas extensiométricas. Estas fuerzas se calcula a partir de ecuaciones diferenciales obteniendo:

Fuerzas transmitidas motores multicilíndricos en línea:

$$Ft_R(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) - \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(\phi_i) \\ + \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) + \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) - \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(2\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) + \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(2\phi_i) \end{array} \right] \hat{r}$$

$$F_{t_L}(t) = m_b * r * \omega^2 \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) + \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(\phi_i) \\ - \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) - \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(\phi_i) \\ + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) + \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \cos(2\phi_i) \\ - \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) - \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \text{sen}(2\phi_i) \end{array} \right] \hat{r}$$

$$F_{t_x} = (F_{t_L} + F_{t_R}) \cos(\gamma) \hat{i}$$

$$F_{t_y} = (F_{t_L} - F_{t_R}) \text{sen}(\gamma) \hat{j}$$

$$F_t = F_{t_x} \hat{i} + F_{t_y} \hat{j}$$

Momentos de sacudimiento transmitidos motores multicilíndricos en línea:

$$\begin{aligned}
 Mt_R(t) = m_b * r * \omega^2 & \left[\begin{aligned}
 & \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) - \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(\emptyset_i) \\
 & + \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) + \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \text{sen}(\emptyset_i) \\
 & + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) - \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(2\emptyset_i) \\
 & + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) + \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \text{sen}(2\emptyset_i)
 \end{aligned} \right] \hat{r}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mt_L(t) = m_b * r * \omega^2 & \left[\begin{aligned}
 & \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) + \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(\emptyset_i) \\
 & - \left(\frac{\cos(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(\gamma) - \frac{\text{sen}(\omega * t)}{1 - \left(\frac{\omega}{w_n}\right)^2} \cos(\gamma) \right) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \text{sen}(\emptyset_i) \\
 & + \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) + \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \cos(2\emptyset_i) \\
 & - \frac{r}{l} * \left(\frac{\cos(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \text{sen}(2\gamma) - \frac{\text{sen}(2\omega * t)}{1 - \left(\frac{2\omega}{w_n}\right)^2} \cos(2\gamma) \right) \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} z_i \text{sen}(2\emptyset_i)
 \end{aligned} \right] \hat{r}
 \end{aligned}$$

$$M_{t_x} = (Mt_L + Mt_R) \text{sen}(\gamma) \hat{i}$$

$$F_{t_y} = (-Mt_L - Mt_R) \cos(\gamma) \hat{j}$$

$$M_t = Mt_x \hat{i} + Mt_R \hat{j}$$

Capítulo IV: Diseño del sistema de control y adquisición de Datos

En este capítulo se presenta una descripción detallada del proceso de selección de los componentes utilizados en la medición de vibraciones y velocidad angular, así como del acondicionamiento de señales para el adecuado funcionamiento del sistema. Se evalúan diferentes opciones para la selección de los sensores y se selecciona el circuito de acondicionamiento más adecuado. Además, se describen las características del PLC y de la HMI utilizadas y se selecciona un módulo analógico adecuado para el PLC. Se describe la interpretación de los datos recopilados para llegar a obtener mediciones de las fuerzas y momentos de sacudimiento que sufre el sistema. Se desarrolla la programación del PLC siguiendo una metodología para el desarrollo de programas estructurados y se programa la Interfaz Humano - Máquina siguiendo las recomendaciones de la guía GEDIS. Finalmente, se diseña el tablero de control, seleccionando los elementos de protección, alimentación, maniobra y control para posteriormente detallar la construcción y el montaje del sistema en su totalidad.

Selección de sensores para medir vibraciones

Galgas Extensiométricas

Las galgas extensiométricas o strain gauges en inglés, son una hoja con una malla conductiva eléctrica, cuando la galga es comprimida o torsionada, a la resistencia eléctrica de la malla crece o decrece de manera proporcional. Si la malla se deforma la corriente eléctrica deberá viajar mayores distancias a través de un conductor más delgado, provocando un aumento en la resistencia eléctrica.

Las galgas extensiométricas pueden medir vibraciones debido a sus características de versatilidad y precisión, pueden ser instaladas sobre casi cualquier superficie con formas distintas y miden cargas estáticas y dinámicas, al medir la deformación directamente es sencillo calcular el esfuerzo en el material de manera precisa.

Otra ventaja de las galgas extensiométricas es su bajo costo y que para su instalación no necesario realizar cambios o alteraciones en el diseño de los sistemas, a pesar de que su instalación es compleja y se requiere preparar adecuadamente la superficie.

Para adquirir adecuadamente la señal de una galga extensiométrica es necesario un circuito electrónico para amplificar la señal y adquirir los datos evitando falsas mediciones.

Acelerómetros

Los acelerómetros son los elementos más comunes para medir vibraciones dentro del campo industrial, como su nombre lo indica, este sensor mide niveles de aceleración lineal y angular, en la unidad de medida representada por el símbolo g igual a la aceleración de la gravedad. Un acelerómetro mide la aceleración gravitacional estática, permitiendo determinar el ángulo de la desviación del objeto medido de la vertical, ya aceleración dinámica causados por golpes, movimiento, impacto o vibración. Si el dato que se requiere es la velocidad o desplazamiento, se puede calcular integrando los datos de aceleración, este cálculo es bastante preciso en movimientos periódicos, sin embargo, en eventos transitorios como choques se presentará un error elevado.

El acelerómetro convierte la energía de vibración en una señal eléctrica proporcional a la aceleración instantánea debido a las fuerzas de sacudimiento del cuerpo en estudio.

Existen tres tipos de acelerómetros que dependen del semiconductor del que están contruidos, estos son:

Acelerómetros Piezoeléctricos. - Son los más utilizados en ambientes industriales para diagnóstico y control de vibraciones; el elemento semiconductor generalmente titanato de circo nato de plomo PZT genera una carga eléctrica proporcional a la deformación, esta deformación es causada por la vibración del cuerpo, este tipo de sensores tienen una alta sensibilidad y precisión. La señal de salida de los acelerómetros piezoeléctricos debe ser amplificada y debe tener compensación de temperatura.

Acelerómetros Piezoresistivos. - Están contruidos con material piezoresistivo, es decir, varía la resistencia proporcionalmente a la deformación detectada, causada por las fuerzas de sacudimiento de la vibración. El sensor cuenta con un circuito integrado que alimenta y recibe la señal de retorno. Estos sensores tienen amplia banda de medición, usado para medir aceleración estática, usado para medir pruebas de choque.

Sin embargo, tienen una baja sensibilidad con aceleraciones pequeñas y con altas frecuencias.

Acelerómetros Capacitivos. – Son sistemas microelectromecánicos MEMS, en donde se ubica el peso sobre los resortes, cuyos extremos están unidos a los condensadores y el otro al elemento de estudio. La fuerza ejercida por la vibración, mueve los resortes provocando un cambio en la distancia entre el condensador y la masa, variando la capacitancia. Estos sensores se caracterizan por su bajo costo y disponibilidad en el mercado, además de su pequeño tamaño, sin embargo, tienen una baja precisión a altas frecuencias, por lo que no son utilizados en aplicaciones industriales.

Giroscopios

Son sistemas microelectromecánicos MEMS, cuentan con tres masas pequeñas resonantes, que se desplazan de acuerdo a los cambios de velocidad angular, es decir, permiten medir la aceleración angular, esta rotación se mide en base a un eje de referencia, en inglés se conocen como yaw, pitch, y roll. Dependiendo de la velocidad angular el giroscopio emitirá una señal de voltaje en mV usando el principio del efecto Coriolis.

En la medición de vibraciones un giroscopio se diferencia con el acelerómetro por tener un marco de referencia, un acelerómetro permite medir fuerzas inerciales de vibración en relación con la gravedad, sin embargo, puede resultar difícil realizar una correcta medición cuando el propio acelerómetro vibra con el sistema. El giroscopio en cambio al tener tres ejes de referencia permitirá conocer la dirección del movimiento.

En ocasiones se usan los giroscopios y acelerómetros como un solo sistema de medición de vibraciones, obteniendo una imagen completa del entorno que está vibrando.

(Hanly, 2020)

Tabla 8

Matriz de selección de sensor de vibraciones

Característica	P e s o	Galgas extensiométricas		Acelerómetros		Giroscopios	
		Calif icaci ón	Característica	Calif icaci ón	Característica	Calif icaci ón	Característica
Resolución	8	8	Elevada	6	Media (depende de las características del sensor)	6	Media (depende de las características del sensor)
Costo	10	10	Bajo	6	Medio-alto	6	Medio-alto
Disponibilidad	10	10	Alto	5	Media	5	Media
Montaje	7	4	Requiere preparar la superficie y pegar la galga	7	Montaje en sitio	7	Montaje en sitio
Sensibilidad	7	5	Lineal en puente completo	5	Depende del sensor	5	Depende del sensor
Requerimiento de módulos externos	9	7	Circuito de acondicionamiento y amplificación	6	Módulo digital con protocolo de comunicación	6	Módulo digital con protocolo de comunicación
Precisión	8	8	Alta	6	Media-alta	8	Alta
Compatibilidad con el sistema	10	8	Se puede usar un módulo de entradas analógico	6	Necesario un módulo de comunicación ex. Terno	6	Necesario un módulo de comunicación externo
Total	69	60		47		49	
Continuar		SI		NO		NO	

Tomando en cuenta que uno de los requerimientos del proyecto es una interfaz industrial y como controlador se va a utilizar un PLC Xinje XC3-32RTE, el cual no cuenta con entradas analógicas, siendo necesario usar un módulo de entradas analógicas XC-2AD-2DA-BD, dos entradas analógicas, y considerando que el sistema ya cuenta con galgas extensiométricas instaladas en la barra de torsión que soporta al prototipo de motor de

combustión interna. Los sensores seleccionados son las galgas extensiométricas, sin embargo, se debe acondicionar la señal para obtener una señal precisa para medir la vibración y fuerzas de sacudimiento del sistema. Las galgas extensiométricas ya se encontraban instaladas previas a la realización de este proyecto, solventando una de las desventajas que involucra este tipo de sensor.

Selección del Circuito de Acondicionamiento de Galgas Extensiométricas

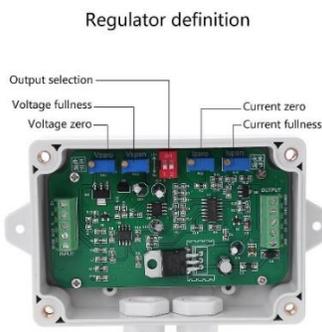
Es necesario un circuito de acondicionamiento de señales para las galgas extensiométricas; el controlador a utilizar el PLC Xinje XC3-32RT-E y el módulo de entradas analógicas requiere de una señal de voltaje de 0-10 V, además considerando que las galgas extensiométricas tienen un factor de 2.065, es necesario alimentar al puente con un voltaje de 5 [V]DC. En el mercado local no hay disponibilidad de módulos de transmisión de señal para galgas extensiométricas, las opciones expuestas a continuación se pueden encontrar en el exterior.

Transmisor para celdas de carga JY-S60

Es una PCB que cuenta con una configuración de circuitos integrados que permiten receptor la señal de voltaje de una celda de carga o configuración de galgas extensiométricas, recibe la señal la amplifica y la acondiciona a diferentes salidas configurables mediante un DIP switch, sus características se muestran en la

Figura 41

Transmisor de celda de carga JY-S60



Nota. Tomado de YJ-S60, por Industrias Andres, 2022,(
<https://industrialesandes.co/sensores/412-transmisor-para-celdas-de-carga-jy-s60-0-10v-4-20ma.html>)

Tabla 9

Características transmisor para celdas de carga JY-S60

Voltaje de operación	24 [V] DC
Señal de salida	0-5 [V] o 0-10[V] o 4-20[mA]
Sensibilidad	1.5-2.1mV/V
Temperatura de operación	-20 a 80C
Voltaje de excitación del puente	5 [V] DC
Montaje	Sobre pared
Linealidad	0.2%
Calibración de span	Mediante potenciómetro

Este módulo cuenta con ajuste de Span o Zero adjustment, permitiendo encerar el sistema cuando no esté sometido a carga, mediante el ajuste de los potenciómetros de la PCB, configurando la salida en cero. Será necesario usar un multímetro para medir la salida de voltaje, además se puede configurar la ganancia de la etapa de amplificación, permitiendo saber el valor exacto de fuerza medida, para ello se debe calcular el voltaje de salida proporcional a los valores máximos y mínimos de la fuerza a medir. (Industriales Andes, 2022)

Transmisor para celdas de carga Omega TXDIN1600S

Es un transmisor de montaje de carril DIN para entradas de celda de carga o galgas extensiométricas. Este módulo es programable, su software de configuración es gratuito, permitiendo escalar el transmisor, y leer en tiempo real los datos de la galga, permitiendo configurar el offset y span de salida.

Tabla 10*Características transmisor de celda de carga TXDIN1600S*

Voltaje de operación	10-48 [V]DC protegido por fusible interno
Señal de salida	0-10[V] ± 0.2 mA 0-21.5 [mA]
Sensibilidad del puente	-7.6 a 7.6 mV/V -38 a 38 mV a 5V de excitación
Linealidad	$\pm 0.01\%$
Excitación del puente	5 [V] DC ± 0.1 V
Temperatura de operación	-30 a 70C
Interfaz de usuario	
Tipo	USB 2.0
Velocidad de transmisión	19.200 baudios
Sistema operativo del equipo	PC con Windows XP o posterior
Escala de calibración	2 a 6 puntos de señal
Filtro	1 y 20 segundos para alcanzar 70% del valor final

Este módulo permite obtener una salida de tensión o de corriente, otra característica que destaca de este equipo es su amplio rango de alimentación que va de 10 a 48 [V]DC y puede funcionar con el uso de baterías. (Omega Engineering inc., 2022)

Figura 42*Transmisor para celda de carga*

Nota. Tomado de TXDIN1600S, por OMEGA, 2022, (<https://www.omega.com/en-us/data-acquisition/signal-conditioners/din-rail-signal-conditioners/txdin1600s-transmitter/p/TXDIN1600S>)

Transmisor de peso WT95

El transmisor de peso para conexión con celdas de carga o galgas extensiométricas es un módulo de amplificación y acondicionamiento de señal para uso industrial, que permite obtener una salida analógica de voltaje o corriente para la lectura de un controlador o PLC. (Wisco Industrial Instruments, 2011)

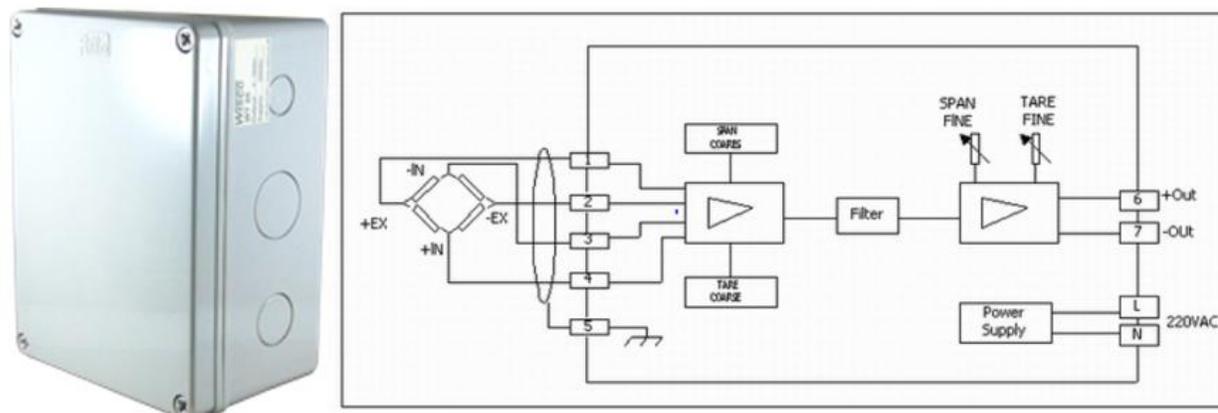
Tabla 11

Características transmisor de peso WT65

Voltaje de operación	110,220 [V] AC
Señal de salida	0-5[V] 4-20 [mA]
Sensibilidad del puente	0.4-3 mV/V
Linealidad	±0.1%
Excitación del puente	5 [V] DC
Temperatura de operación	0 a 55C
Ajuste de span	0.4 a 3mV/V con DIP switches ±5% mediante potenciómetro
Protección	IP65
Tipo de montaje	Sobre pared
Dimensiones	200x150x80 mm
Filtro	Seleccionable 0.6 sec, 1.2 sec, 2 sec

Figura 43

Transmisor de peso WT65



Nota. Adaptado de WT65, por OMEGA, 2011, (<https://www.wisco.co.th/main/model/wt95>)

Para la selección del módulo de transmisión de señales para galgas extensiométricas se analizaron diferentes factores en base a los demás componentes que se van a utilizar en el sistema de adquisición de datos, fuentes de voltaje, disponibilidad y características propias de los módulos, la matriz de selección se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Matriz de selección de módulo para galgas extensiométricas

Característica	Peso	JY-S60		TXDIN1600S		WT65	
		Calificación	Característica	Calificación	Característica	Calificación	Característica
Voltaje de alimentación	10	10	24 V DC	10	10-48 VDC	7	110/220 V AC
Voltaje de excitación del puente	10	10	5 V DC	10	5 V DC	10	5 V DC
Señal de salida	10	10	0-5 V 0-10 V 4-20mA	10	0-10 V 0-21.5 mA	5	0-5 V 4-20 mA
Disponibilidad	8	6	Media	2	Baja	2	Baja

Montaje	3	2	Sobre pared	3	Riel DIN	2	Sobre pared
Precio	7	6	\$25	1	\$300	5	\$50
Linealidad	7	5	0.002	7	0.0001	6	0.1%
Calibración de Span	7	6	Mediante potenciómetro	6	2 a 6 puntos de señal y potenciómetro	7	DIP switch y 5% mediante potenciómetro
Sensibilidad	7	6	1.5-2.1mV/V	5	-7.6 a 7.6 mV	6	0.4-3mV/V
Total	62	61		54		50	
Continuar		SI		NO		NO	

Selección del Encoder de velocidad angular

Para la comprensión del funcionamiento del sistema y la relación entre las fuerzas de vibración y el movimiento recíproco del motor es necesario conocer la velocidad de giro o velocidad angular del cigüeñal, es necesario la utilización de un encoder incremental, este debe ser capaz de medir la velocidad de giro del cigüeñal y enviar la señal de pulsos con valores de frecuencia y amplitud adecuado para ser recibidos por el PLC a utilizar.

Encoder Omron E6B2-CWZ3E

Figura 44

Encoder E6B2-CWZ3E



Nota. Tomado de Grupo Electrostore, por OMRON 2019,

(<https://grupestore.com/shop/sensores/encoders/encoder-e6b2-cwz3e-1000p-r-omron/>)

Es un encoder rotativo tipo incremental, compacto y tiene resolución de 1000 pulsos por revolución, considerando que la fuente de alimentación a utilizar es de 24 V, al usar este encoder será necesario utilizar un módulo regulador de voltaje para obtener la señal adecuada.

Tabla 13

Características encoder Omron E6B2-CWZ3E

Características	Omron E6B2-CWZ3E
Voltaje de Operación	5-12 V
Resolución	1000 P/R
Diámetro exterior	40 mm
Diámetro del eje	6 mm
Máxima frecuencia de respuesta	100 kHz
Velocidad máx permisible	6000 rev/min
Señales de Salida	A,B,Z
Longitud del Cable	2 m
Tipo de salida	NPN
Precio	\$45
Consumo de corriente	100 mA max
Diferencia de fase en la salida	90 DEG -45 a +45 DEG
Peso	100 g

Nota. Adaptado de Grupo Electrostore, por OMRON 2019,

(<https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/encoders/encoder-e6b2-cwz3e-1000p-r-omron/>)

Encoder Omron E40S6-1000-3T-24

Es un encoder rotativo tipo incremental, compacto y tiene resolución de 1000, la velocidad máxima de medición es de 5000rpm, la ventaja de este encoder es el voltaje de operación de 24 V, sin embargo, su precio es elevado

Figura 45*Encoder E40S6-1000-3T-24*

Nota. Tomado de Autonics, por OMRON 2019,

(https://www.autonicsonline.com/product/product&product_id=4374)

Tabla 14*Características encoder Omron E6B2-CWZ3E*

Características	Omron E40S6-1000-3T-24
Voltaje de Operación	12-24 V DC
Resolución	1000 P/R
Diámetro exterior	40 mm
Diámetro del eje	6 mm
Máxima frecuencia de respuesta	100 kHz
Velocidad máx permisible	5000 rev/min
Precio	\$202.75
Grado de protección	IP50
Señales de Salida	A,B,Z
Longitud del Cable	2 m
Tipo de salida	NPN
Precio	\$45
Consumo de corriente	100 mA max
Diferencia de fase en la salida	90 DEG -45 a +45 DEG
Peso	120 g

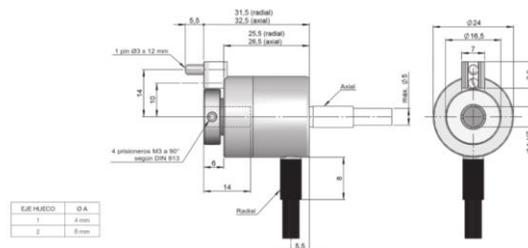
Nota. Adaptado de Autonics, por OMRON 2019,

(https://www.autonicsonline.com/product/product&product_id=4374)

Encoder Serie 28 eje semi hueco Hohner

Figura 46

Encoder serie 28 Hohner



Nota. Tomado de DISAI Automatic Systems, por Hohner Automation, 2022,
(<https://www.disai.net/catalogo/>)

Es un encoder miniatura con excelentes características para trabajar en aplicaciones industriales, el rango del voltaje de operación es amplio permitiendo alimentar al encoder con 24 V, además cuenta con diferentes opciones de acoplamiento.

Tabla 15

Características encoder Serie 28 eje semi hueco Hohner

Características	Hohner Serie 28
Voltaje de Operación	11..30 [V] DC
Resolución	4096 P/R
Diámetro exterior	24 mm
N máx de rev permisible	6000 rpm
Protección	IP64
Fijaciónn al eje	Mediante prisionero o abrazadera
Diámetro del eje	6 mm
Señales de salida	A+B , A+B+0
Peso	0.06kg
Consumo	40 mA

Nota. Adaptado de DISAI Automatic Systems, Hohner Automation, 2022,

(<https://www.disai.net/catalogo/>)

Para la selección del encoder se debe considerar las características del motor el cuál puede girar hasta un máximo de 6000 rpm, además la relación de transmisión para las diferentes configuraciones de motores recíprocos es de 6:1, además se debe considerar las características del controlador, en este caso el PLC XC3-32RT-E, cuenta con contadores rápidos que permiten la conexión directa del encoder, además de las características de la fuente de voltaje y los demás elementos del sistema de control, la matriz de selección se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Matriz de selección de Encoder incremental

Característica	Peso	E6B2-CWZ3E		E40S6-1000-3T-24		E40S6-1000-3T-24	
		Calificación	Característica	Calificación	Característica	Calificación	Característica
Voltaje de alimentación	8	5	5-12 V	8	12-24 V DC	8	11-30 V DC
Diámetro Exterior	7	6	40 mm	6	40 mm	7	24 mm
Diámetro del eje	9	9	6 mm	9	6 mm	9	6 mm
Resolución	8	8	1000 P/R	8	1000 P/R	8	4096 P/R
Velocidad máx. permisible	9	9	6000 rev/min	6	5000 rev/min	9	6000 rev/min
Precio	9	9	\$45	5	\$202.75	5	\$175
Acoplamiento al eje	9	8	Acople flexible con prisionero	8	Acople flexible con prisionero	8	Mediante prisionero o abrazadera
Peso	7	6	100 g	5	120 g	7	60 g
Frec. máx Total	8	8	100 kHz	8	100 kHz	8	100 kHz
Total	74	68		63		61	
Continuar		SI		NO		NO	

Descripción del PLC Xinje XC3-32RT-E

El controlador lógico programable del fabricante Xinje, usado para proyectos industriales, cuenta con 18 entradas digitales, y 14 salidas digitales de relé, es un PLC modular permitiendo el uso de módulos de expansión, las características se describen en la Tabla 17 a continuación.

Tabla 17

Características PLC Xinje XC3-32RT-E

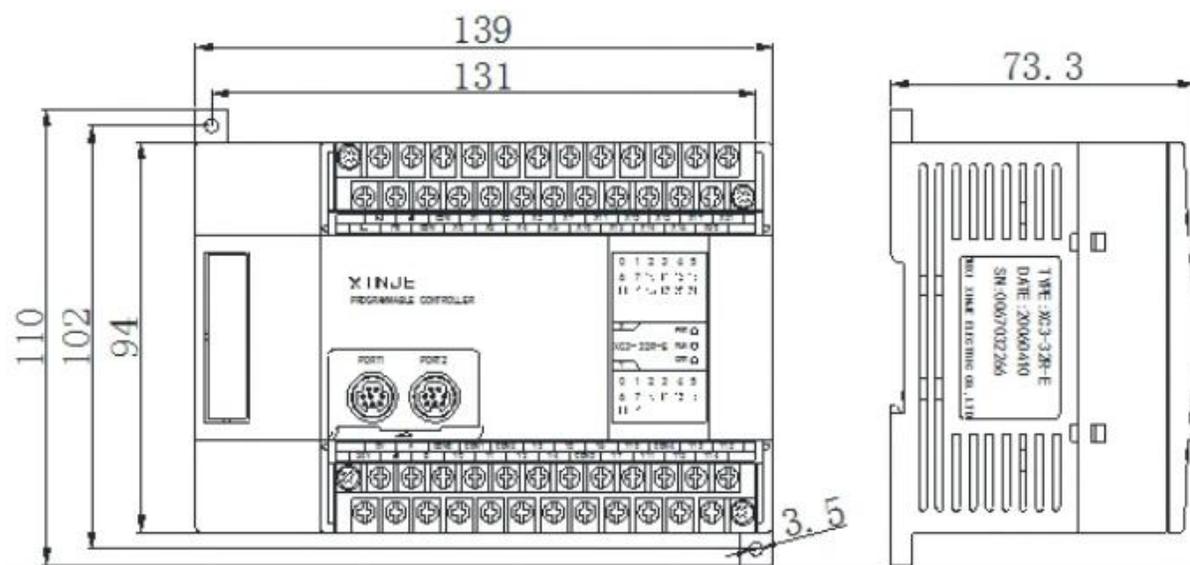
Capacidad de programa	8000 pasos 128 K
Número de entradas digitales	18
Tipo de entrada	NPN o contacto libre de voltaje
Voltaje de la señal de entrada	24 VDC $\pm 10\%$
Número de salidas digitales	14
Tipo de salida	Relé 3 ^a 250 VAC/ 30 VDC Carga resistiva/ 80 VA Carga inductiva
Puntos máximos de expansión entradas y salidas	228 (7 módulos de expansión)
Marcas internas (M)	8512
Tiempo de scan	0-99 ms
Reloj en tiempo real	Sí
Puertos de comunicación	COM1: RS232 / COM2: RS485
Alimentación	90-260 VAC
Contadores de alta velocidad	6 en modo incremental, 3 de pulso y dirección, 3 AB fase 80 kHz

Nota. Adaptado de XC Series Programmable Controller User Manual, por XINJE Electronic Co.

Ltd., 2022. (www.xinje.com)

Figura 47

Dimensiones Xinje XC3-32RT-E



Nota. Tomado de XC Series Programmable Controller User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022. (www.xinje.com)

Selección del módulo analógico

En la medición de la fuerzas y momentos de sacudimiento se usará galgas extensiométricas para medir la deformación en la barra de torsión del modelo, el PLC disponible no cuenta con entradas analógicas que permiten leer y convertir esta señal, sin embargo, la marca dispone de módulos de expansión.

XD-E2WT-C

Este módulo de expansión puede medir voltaje en un rango de 0-10mV, es decir es adecuado para la medición de sensores de fuerza y presión como las galgas extensiométricas. Transformando la señal analógica mediante un convertidor A/D. (Xinje, 2022)

Tabla 18*Características módulo XD-E2WT-C*

Rango de entrada	0-10 mV DC
Número de entradas	2
Resolución A/D real	1/1048575 (20 bit)
No linealidad	0.01% FS
Voltaje de alimentación	220 V AC 50/60 Hz
Voltaje de alimentación al sensor	5 V DC/120mA
Dimensión	63x108x89.9 mm
Instalación	Riel DIN46277
Precio	\$450

Nota. Adaptado de XC Series Programmable Controller User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022. (www.xinje.com)

XC-E4AD-H

Es un módulo de expansión con 4 canales analógicos de entrada, que puede funcionar con voltaje o corriente, transforma la señal analógica de entrada a una señal digital para ser registrada en el PLC. (Xinje, 2022)

Tabla 19*Características módulo XC-E4AD-H*

Rango de entrada	0-5 V, 0-10VDC, 0-20mA, 4-20mA
Número de entradas	4
Resolución A/D real	1/16383 (14 bit)
Precisión de síntesis	0.8%
Voltaje de alimentación	24 V DC
Dimensión	63x102x73.3 mm
Instalación	Riel DIN46277
Precio	\$250

Nota. Adaptado de XC Series Programmable Controller User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022. (www.xinje.com)

XC-2AD2DA-BD

Es una tarjeta PCB de expansión que se monta sobre el propio PLC, cuenta con 2 entradas y 2 salidas análogas que pueden ser usadas con corriente o voltaje.

Tabla 20

Características módulo XC-2AD-2DA-BD

Rango de entrada	0-5 V, 0-10VDC
Rango de salida	0-20mA, 4-20mA
Número de entradas	2
Número de salidas	2
Resolución A/D real	1/16383 (14 bit)
Precisión integrada	0.8%
Instalación	Socket del PLC
Precio	\$150

Nota. Adaptado de XC Series BD board for special functions Operate Manual, por XINJE

Electronic Co. Ltd., 2022. (www.xinje.com)

En la matriz de selección mostrada en la Tabla 21 se considera los requerimientos del proyecto y las características de funcionamiento de los demás elementos elegidos para el sistema de control.

Tabla 21*Matriz de selección del módulo analógico*

Característica	Peso	XD-E2WT-C		XC-E4AD-H		XC-2AD2DA-BD	
		Calificación	Característica	Calificación	Característica	Calificación	Característica
Voltaje de alimentación	10	5	220 VAC	9	24 V DC	10	24 V PLC
Número de entradas A	10	10	2	10	2	10	2
Número de salidas A	6	0	0	0	0	6	2
Rango de entrada	7	6	0-10 mV DC	6	0-5 V, 0-10VDC, 0-20mA, 4-20mA	6	0-5 V, 0-10VDC
Montaje	7	6	Riel DIN46277	6	Riel DIN46277	7	Sobre el PLC
Precio	9	5	\$450	6	\$250	8	\$150
Resolución	8	8	1/1048575 (20 bit)	7	1/16383 (14 bit)	7	1/16383 (14 bit)
Total	57	40		44		54	
Continuar		NO		NO		SI	

Descripción de la HMI Xinje Touch Win TG865

La interfaz humano máquina HMI del fabricante Xinje de la serie TG es una pantalla de alta calidad, con 16 millones de colores TFT-LCD, soporta formatos BMP y JPG, el software de programación es cuenta con una amplia librería de imágenes 3D, funciones de adquisición de datos, curva de tendencias, cuenta con interfaz USB permitiendo comunicación de alta velocidad, permitiendo la comunicación con diferentes PLC de manera simultánea, y soportando comunicación Ethernet. (Xinje, 2020)

Figura 48*HMI Xinje Touchwin TG865*

Nota. Tomado de TouchWin edit tool User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022.

(www.xinje.com)

Tabla 22*Características Touchwin TG865*

Pantalla	
Tamaño	8.0"
Tipo	16 millones de colores
Resolución	800*600
Brillo	Ajustable mediante potenciómetro
Panel Táctil	Modo de resistencia de 4 hilos
Vida útil	Mayor a 50 000 horas a 25C 24h
Idiomas	Chino, Inglés, Japonés, Coreano, Español, Alemán, Francés, Árabe, etc
Memoria	128 MB
Eléctricas	
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo de corriente	190 mA
Ambientales	
Temperatura de operación	-20 - 60C
Humedad	10% RH- 90%RH

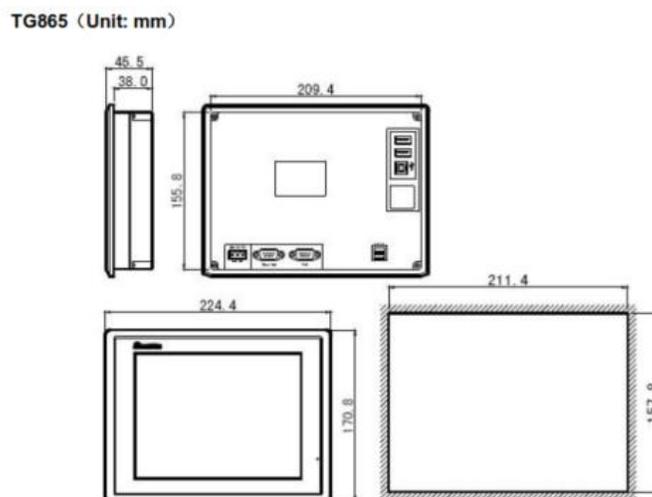
Grado de protección	IP65
Construcción	
Método de enfriamiento	Ventilación natural
Dimensiones exteriores	224.4x170.8x45.5
Dimensiones de montaje	211.4x157.8
Interface	
COM1	RS232/RS485/RS422
COM2	RS232/RS485
Puerto ethernet	RJ45 Serie ET
USB1	USB-A 2.0
USB2	USB-B 2.0

Nota. Adaptado de TouchWin edit tool User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022.

(www.xinje.com)

Figura 49

Dimensiones Touchwin TG865



Nota. Tomado de TouchWin edit tool User Manual, por XINJE Electronic Co. Ltd., 2022.

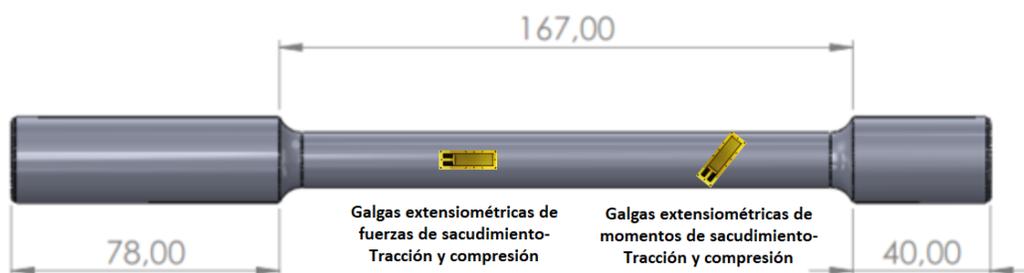
(www.xinje.com)

Medición de fuerzas y momentos de sacudimiento mediante las galgas extensiométricas

La barra en voladizo de la máquina originalmente contaba con dos pares de galgas extensiométricas, permitiendo medir fuerzas y momentos de sacudimiento respectivamente, sin embargo, el estado de las galgas ya no era funcional, estaban deformadas, la soldadura de los cables conductores estaba desprendida. Inicialmente las galgas se encontraban ubicadas de la siguiente manera:

Figura 50

Galgas extensiométricas en la barra en voladizo de la máquina

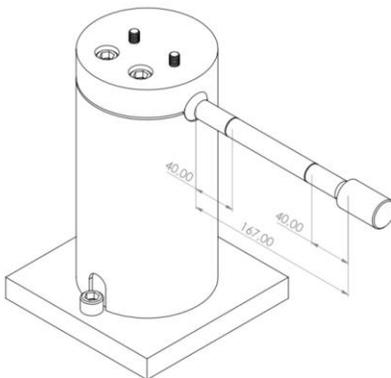


Análisis mecánico de la barra en voladizo

Par la instalación de nuevas galgas extensiométricas es necesario realizar el estudio mecánico de la barra en voladizo.

Figura 51

Secciones para galgas extensiométricas en la barra en voladizo



Considerando que las galgas extensiométricas para medir esfuerzos de flexión y tracción se instalarán a 40 mm del extremo cercano al bastidor y las galgas para medir esfuerzos de torsión se ubicarán a 40 mm del extremo cercano al motor, se analizará la correcta ubicación de las galgas en ambas secciones.

Sección A Galgas Extensiométricas de Flexión y Compresión

El momento está definido por:

$$M = P * L_c$$

Donde P es la fuerza transmitida por el motor y L_c es la distancia del motor a la sección A, de esta manera el esfuerzo flector se expresa:

$$\delta = \frac{My}{I}$$

$$\delta = \frac{(P * L_c)r}{\frac{\pi r^4}{4}} = \frac{32(P * L_c)}{\pi * d^3}$$

Considerando que el esfuerzo es igual a:

$$\delta = E * \epsilon_1$$

Donde E es el módulo de Young o módulo de elasticidad y ϵ_1 es la deformación unitaria, se expresa:

$$\delta = \frac{32(P * L_c)}{\pi * d^3} = E * \epsilon_1$$

Podemos expresar la fuerza transmitida por el motor en función de la deformación que es medida por la galga, en el punto H1.

$$P = \frac{E\pi d^3 \epsilon_1}{32 * L_c} = F_t$$

Sección B Galgas extensiométricas de torsión

Al ser una barra cilíndrica el esfuerzo cortante viene dado por la expresión:

$$\tau = \frac{Tr}{J}$$

Donde T es el torque aplicado, en este caso corresponde al momento transmitido por el motor, r es el radio de la sección de la barra, y J es el momento polar de inercia.

$$\tau = \frac{Td/2}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16T}{\pi * d^3}$$

El momento flector se puede expresar en función de la deformación angular γ , y el módulo de rigidez G , se obtienen la expresión del momento transmitido en función de la deformación angular de la barra:

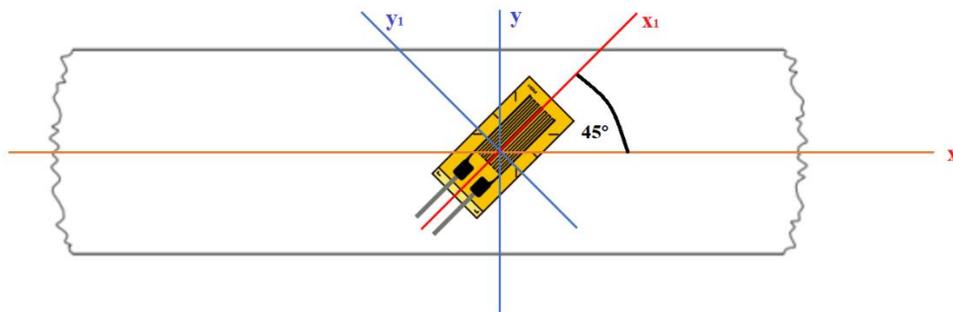
$$\tau = G * \gamma \quad \therefore \quad \tau = \frac{16T}{\pi * d^3} = G * \gamma$$

$$T = \frac{\pi d^3}{16} G \gamma$$

Si consideramos que las galgas extensiométricas formarán un puente completo y están ubicada a 45° del eje axial, la deformación que cambiará el valor resistivo de las galgas depende de la deformación en este nuevo eje de la galga que se muestra en la Figura 52.

Figura 52

Galga extensiométrica de torsión 45°

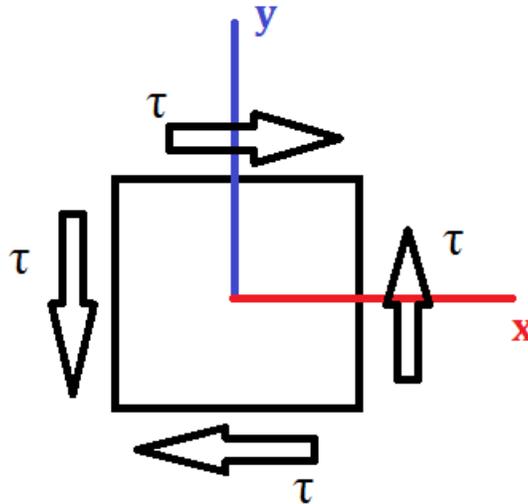


$$\epsilon_{x1} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos(2\theta) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \text{sen}(2\theta)$$

Considerando el elemento diferencial en el punto Hs, como se observa en la Figura 53, se obtiene la deformación en función del torque en función de la deformación que recibe la galga.

Figura 53

Elemento diferencial punto Hs



$$\epsilon_x = 0$$

$$\epsilon_y = 0$$

$$\epsilon_{x_1} = 0.5\gamma_{xy}\text{sen}(2\theta)$$

Siendo ϵ_s la deformación lineal en el plano x_1

$$\epsilon_s = 0.5\gamma_{xy}\text{sen}(2x + 5)$$

$$\epsilon_s = 0.5\gamma_{xy} \quad \therefore \quad \gamma_{xy} = 2\epsilon_s \quad \therefore \quad T = \frac{\pi d^3}{16} G(2\epsilon_s)$$

$$T = \frac{\pi d^3}{8} G\epsilon_s$$

El coeficiente de rigidez depende del módulo de Young y el coeficiente de Poisson ν .

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Torsión Medio puente

$$R_s = R + \delta R$$

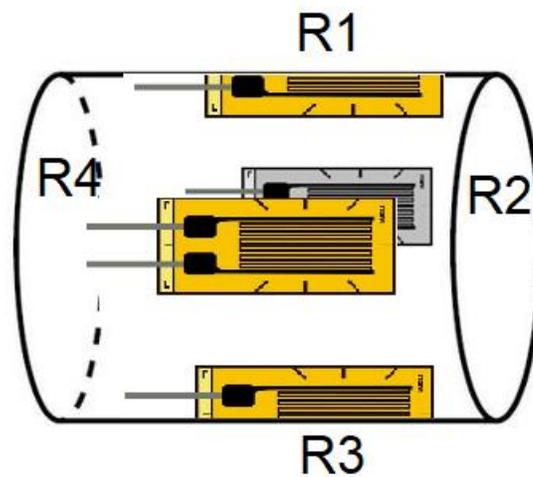
$$R'_s = R - \delta R$$

Flexión Puente Completo

Considerando la distribución de las galgas como se muestra en la Figura 54, las galgas que se consideran cambian su valor de resistencia debido a la deformación son R_1 y R_3

Figura 54

Distribución de las galgas de flexión



$$\epsilon_1 \rightarrow R_1 = R + \delta R$$

$$\epsilon_3 \rightarrow R_3 = R - \delta R$$

$$\epsilon_2 \rightarrow R_2 = R$$

$$\epsilon_4 \rightarrow R_4 = R$$

Considerando que el acero es un material isotrópico, es decir sus propiedades no varían con la dirección de su estructura, el coeficiente de Poisson se expresa como la razón entre la

deformación debido a la compresión y la deformación debido a la tensión, considerando que el coeficiente para acero es de 0.3, la deformación debido a la compresión se expresa:

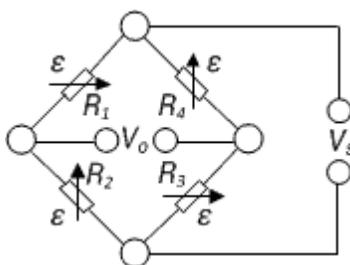
$$\mu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_L} = 0.3$$

$$\epsilon_t = -0.3\epsilon_L$$

De esta manera la deformación que mide el puente de Wheatstone conectado como se muestra en la Figura 55 es:

Figura 55

Conexión de puente de Wheatstone para flexión



Nota. Tomado de *Puente completo mediciones de deformaciones de flexión*, por HBM and HBK company, 2022, (<https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>)

$$\epsilon = \frac{V_o}{k * V_s}$$

Donde:

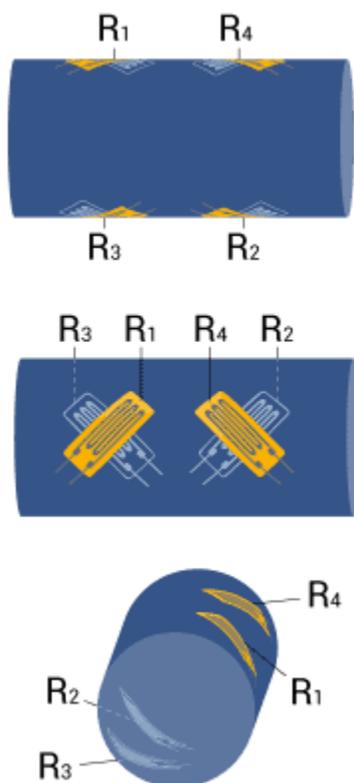
V_o : es la tensión de alimentación del puente

k : es el factor de la galga

V_s : es el voltaje de salida de la galga

Torsión Puente Completo

Las galgas disponibles para el puente de Wheatstone de medición de torsión son rosetas que forman el ángulo de 45° necesario y la instalación será como se muestra en la

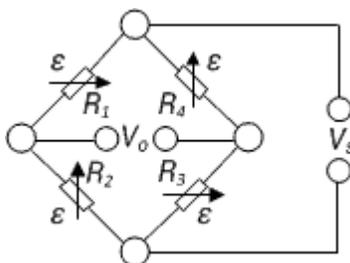
Figura 56*Puente de Wheatstone de torsión*

Nota. Tomado de *Puente completo mediciones de deformaciones de torsión*, por HBM and HBK company, 2022, (<https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>)

Este tipo de montaje de galgas es usualmente usado en situaciones de espacio de instalación limitado, en nuestro caso al ser un eje de 16 mm de diámetro fue necesario el uso de rosetas cuyas galgas optimizan el espacio de instalación, una ventaja de esta configuración es la potente señal de salida y buena compensación de efectos de temperatura, la conexión de este tipo de configuración se muestra en la Figura 57.

Figura 57

Conexión puente de Wheatstone torsión



Nota. Tomado de *Puente completo mediciones de deformaciones de torsión*, por HBM and HBK company, 2022, (<https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>)

La deformación se expresa:

$$\varepsilon = \frac{V_o}{k * V_s}$$

Selección de galgas extensiométricas

Para la selección del tipo de galgas extensiométricas se debe considerar el tipo de medición flexión o torsión que se desea realizar, orientación de las galgas, espacio disponible, y tipo de puente a instalar.

Galgas de flexión. Las galgas formarán un puente completo, es decir, la conexión estará formada por cuatro galgas iguales que cambiarán su valor en base a la deformación de la superficie, y no será necesario el uso de galgas de compensación de temperatura. Para el caso de flexión y por la orientación de la galga que se encuentra horizontalmente y permanece fija durante el movimiento del prototipo es recomendable el uso de galgas extensiométricas uniaxiales.

La galga extensiométrica usada es la SG-3/120-LY13 disponible en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con las características mostradas en la Tabla 23.

Tabla 23

Características galgas extensiométricas de flexión

Galga extensiométrica SG-3/120-LY13	
Característica	Descripción
Factor de galga	2.12
Valor	120 Ω
Tolerancia	$\pm 0.15\%$
Longitud de la rejilla activa	3
Ancho de la rejilla activa	1.5
Dimensiones de la galga	7.80x3.80
Voltaje Máx	5.5 V
Material de la rejilla activa	Constantán
Encapsulado	Poliamida 45 μm

Nota. Adaptado de *Specifications- Series Y*, por HBM an HBK company, 2022,

(<https://www.straingauges.cl/images/blog/catalogo%20de%20strain%20gages.pdf>)

Galgas de Torsión. La configuración de puente completo para medir torsión requiere de cuatro galgas iguales ubicadas a 45 grados del eje axial de la barra para, además considerando el diámetro se debe escoger galgas del tamaño adecuado que faciliten su instalación.

Las galgas disponibles seleccionadas son galgas triaxiales, para facilitar el montaje se usará este tipo de galgas con tres rejillas activas, una de ellas no se utilizará y servirá de guía

para alinearla con el eje axial de la barra, de esta manera las rejillas restantes estarán ubicadas a 45°, el modelo y descripción de la galga se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

Características galgas extensiométricas de torsión

Galga extensiométrica 6/120RY11	
Característica	Descripción
Factor de galga	1.94
Valor	120 Ω
Tolerancia	$\pm 0.35\%$
Sensibilidad	-0.2%
Coeficiente de temperatura del factor de la galga	$104 \pm 10 [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$
Longitud de la rejilla activa	2
Ancho de la rejilla activa	1.4
Dimensiones de la roseta	11x11
Voltaje Máx	5.5 V
Material de la rejilla activa	Constantán
Encapsulado	Poliamida 45 μm

Nota. Adaptado de *Specifications- Series Y*, por HBM an HBK company, 2022,

(<https://www.straingauges.cl/images/blog/catalogo%20de%20strain%20gages.pdf>)

Programación del PLC

En la presente sección se detalla el procedimiento y la metodología aplicada para el desarrollo de la lógica de control del Controlador Lógico Programable XINJE XC3-32RT-E como la unidad de procesamiento central del sistema de adquisición de datos.

Los lineamientos sobre los cuales se realiza la programación del autómata programable son provistos por la normativa 61131-3 dictada por la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC), siendo este documento la primera redacción técnica que estandariza los lenguajes de programación para automatización industrial. En esta norma se establecen principios y consideraciones sobre: Requerimientos de equipos y pruebas, Lenguajes de programación, Guías de Usuario, Protocolos de Comunicación, Seguridad Funcional, Programación orientada a control difuso e Interfaces de Comunicación. Esta documentación recalca la importancia de la identificación de variables, el correcto establecimiento de tipos de datos y consecuentemente se extienden herramientas para el análisis de problemas de control mediante separación de configuraciones, recursos, programas, tareas y bloques funcionales mediante los cuales la interpretación de un programa desarrollado para automatización industrial se vuelve manejable. Mediante la revisión del mencionado documento, sintetizado en el artículo (PLCopen, IEC 61131-3: a standard programming resource, 2016), se opta el método de desarrollo “hacia abajo” para el presente caso de estudio, por lo que este problema de control será estudiado desde su principio de funcionamiento y elementos comunes de forma progresiva hasta conseguir un programa que dé solución a las necesidades planteadas.

La lógica de programación es desarrollada sobre la interpretación de la normativa internacional IEC 61131-3 propuesta por (PLCopen, 2016) en su artículo publicado sobre una eficiente alineación de los criterios planteados por la normativa mencionada con particular enfoque en ofrecer un acercamiento modular y disgregativo hacia un desarrollo de programación estructurado. Esta propuesta consiste en tomar las herramientas técnicas provistas por la normativa IEC 61131-3 para tratar con las etapas de programación, instalación y mantenimiento de software en proyectos de control industrial, haciendo un uso consistente del contenido de la normativa para generar software legible, verificable, reusable y mantenible.

En el trabajo “Estructuración del desarrollo de programación con IEC 61131-3” de (PLCopen, 2016), se establecen los siete pasos desplegados a continuación como una guía hacia una exitosa estructuración de la programación:

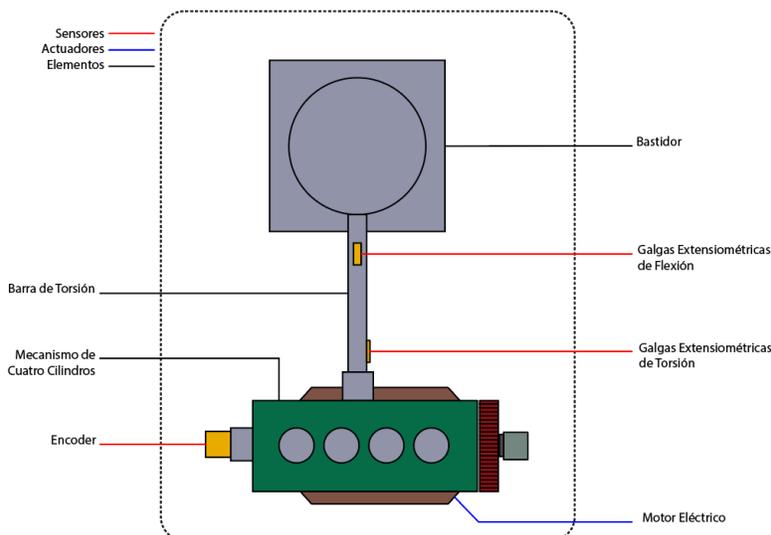
Identificación de las interfaces externas al sistema de control

En este paso se explica el principio de operación del sistema y se reconocen las zonas de comunicación o acción entre el sistema de control y sistemas externos. Se identifican y separan los instrumentos de monitoreo de los actuadores para analizar el papel que desempeña cada uno dentro del sistema como un dispositivo individual y la función que cumple en relación con el objetivo de control.

La planta que corresponde al presente caso de estudio hace alusión al sistema compuesto por el bastidor, la barra de torsión, el motor eléctrico, el mecanismo de cuatro cilindros y el sistema de adquisición de datos. En la Figura 58 a continuación representa un esquema tecnológico de la vista superior de la planta estudiada, se indican todos elementos que la componen, y se identifican los sensores que constituyen al sistema de adquisición de datos.

Figura 58

Diagrama de componentes de la planta



Considerando que el sistema de control analizado corresponde únicamente al sistema de adquisición de datos, se toman en cuenta solamente las interfaces periféricas entre este sistema y el resto de la planta como se describió en esta sección, siendo dichas interfaces los instrumentos de medición dispuestos para el monitoreo de las variables de interés:

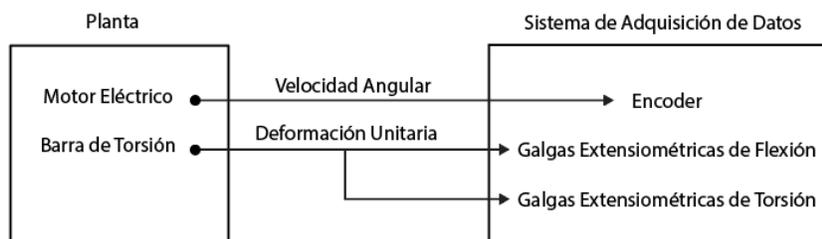
- Lectura del puente de Wheatstone las galgas extensiométricas de torsión
- Lectura del puente de Wheatstone las galgas extensiométricas de flexión
- Lectura del encoder del cigüeñal

Definición de las principales señales intercambiadas entre el sistema de control y la planta

Una vez se hayan identificado las interfaces externas al sistema de control, se procede a identificar las señales que son intercambiadas mediante dichas interfaces, así como también se identifican las acciones de acoplamiento entre nuestro sistema de control y el resto de la planta. Al tratarse este sistema de control enteramente de un sistema de adquisición de datos, se evidencia que no existen intercambios de señales entre la planta y el mencionado sistema además de las señales recibidas por los sensores, pues no se ejerce control sobre ningún elemento de actuación, sino que solamente se recoge la lectura de los múltiples sensores identificados en el paso anterior. La interpretación gráfica de esta consideración se refleja en la Figura 59 a continuación.

Figura 59

Definición de señales intercambiadas entre el sistema de control y la planta



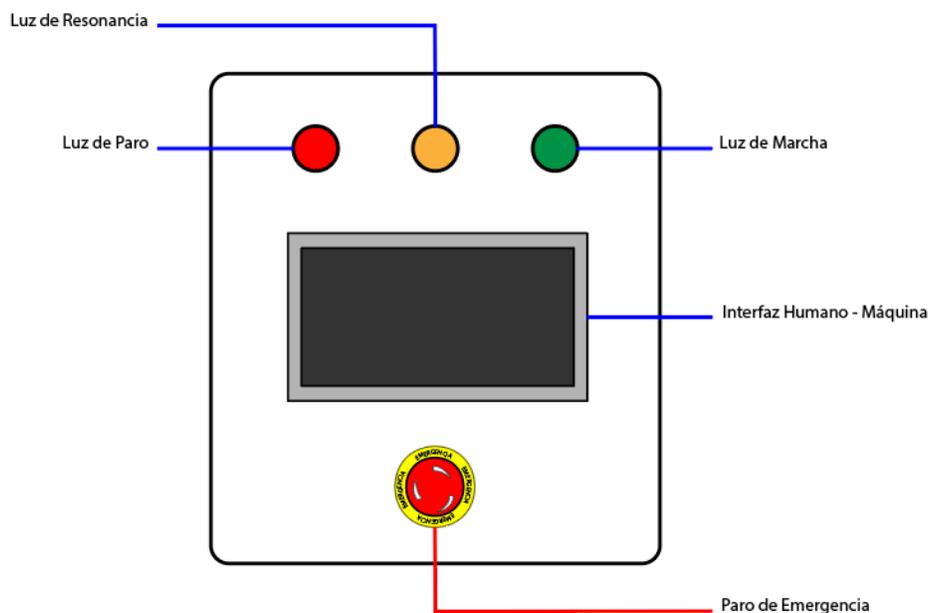
Definición de todas las interacciones con el operador

Este paso comprende la definición de los elementos de comando y funciones asociadas a dichos elementos mediante los cuales el operador ha de ejercer una orden sobre el sistema de control o cancelarla, así como también se identifican los datos de interés que son necesarios supervisar y monitorear.

En la Figura 60 a continuación representa un esquema del exterior del cajetín eléctrico compuesto por los elementos de interacción y supervisión del sistema.

Figura 60

Elementos de control e indicadores de interacción con el operador



La única interacción directa entre el operador y el sistema radica en el accionamiento y liberación de una seta de paro de emergencia que cumple con la función de detener el sistema completamente. Mientras que los datos que son menester supervisar son las lecturas de los sensores que nos indicarán, mediante la interfaz humano - máquina, la información sobre las fuerzas de desbalanceo que sufre la barra de torsión y la velocidad angular del cigüeñal.

Dado que la mayor parte de la información será presentada mediante una Interfaz Humano Máquina, los elementos de supervisión utilizados son luces piloto que cumplen con la función de indicadores del estado de la planta, mientras que el indicador ámbar sugiere alerta cuando la velocidad del cigüeñal se aproxima al intervalo en el que el banco de pruebas alcanza la resonancia, encendiéndose con un margen de velocidad 10% menor y mayor a la velocidad de resonancia.

- Luz de Paro
- Luz de Marcha
- Luz de Resonancia
- Seta de Paro de Emergencia

Análisis del sistema de control descompuesto en particiones lógicas

Para este paso es pertinente tener un completo entendimiento del problema de control y una clara noción de la operación del sistema, pues este debe ser analizado desde el nivel más superficial hacia el nivel más bajo en el que sea posible descomponer el problema, y de esta forma se determinan las particiones lógicas asociadas al sistema completo, a funciones de monitoreo y funciones de acción.

Debido a la característica minimalista de un sistema de adquisición de datos, se deduce que el presente problema de control puede ser sintetizado dentro de un único programa dedicado a recopilar la información provista por los sensores asociados al sistema. Con el objetivo de mejorar la organización y cumplir con el propósito de modularidad recomendado por la normativa utilizada, se descompone el mencionado programa en particiones lógicas destinadas a la adquisición de datos de cada instrumento involucrado:

- Secuencia principal: Inicio y paro del sistema, control de luces piloto y paro de

emergencia.

- Lectura Torsión: Lectura de la señal del puente de Wheatstone de las galgas extensiométricas de torsión y tratamiento de los datos.
- Lectura Flexión: Lectura de la señal del puente de Wheatstone de las galgas extensiométricas de flexión y tratamiento de los datos.
- Lectura Encoder: Lectura del encoder de la velocidad angular del cigüeñal y tratamiento de los datos.

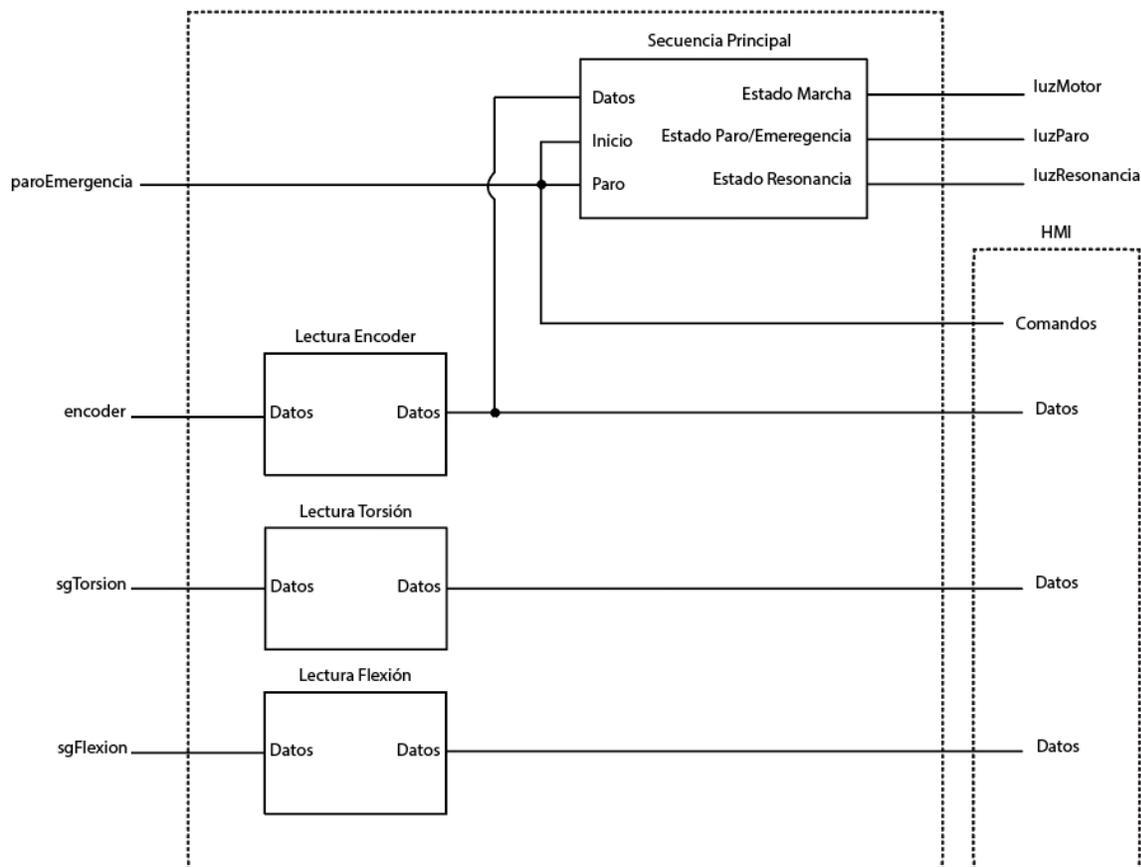
Definición de las Unidades de Organización de Programa requeridos

En concordancia con la descomposición realizada en el paso anterior, se hace uso del lenguaje gráfico de programación Diagrama de Bloque de Función (FBD) y la herramienta Cuadro de Función Secuencial (SFC) para expresar las particiones lógicas definidas previamente como bloques de acción, definir sus entradas y salidas, relacionarlas entre sí y determinar la secuencia de operación del programa.

Mediante el uso del lenguaje de programación FBD es posible representar el sistema de control sobre las particiones lógicas consideradas en el paso anterior como se muestra en la figura a continuación:

Figura 61

Diagrama de bloques organizacionales del sistema de control



A partir de los bloques organizacionales delimitados en el diagrama de la Figura 61, es posible desarrollar la lógica secuencial del sistema y plantearla mediante un diagrama Grafset como se muestra en las figuras a continuación. En este diagrama es posible diferenciar cada uno de los bloques funcionales en los que ha sido descompuesto el problema de control, de modo que a cada secuencia le corresponde una función asociada a cada bloque, es decir, la secuencia principal tiene el propósito de dar inicio y paro al sistema y controlar las luces indicadoras, además de incluir una subsecuencia destinada al parpadeo de la luz intermitente del estado de emergencia; mientras que, los tres bloques de lectura son sintetizados en sus propias

secuencias encargadas de dar lectura a sus sensores correspondientes y desplazar la información hacia los registros pertinentes.

Figura 62

Graficet de la secuencia principal de control

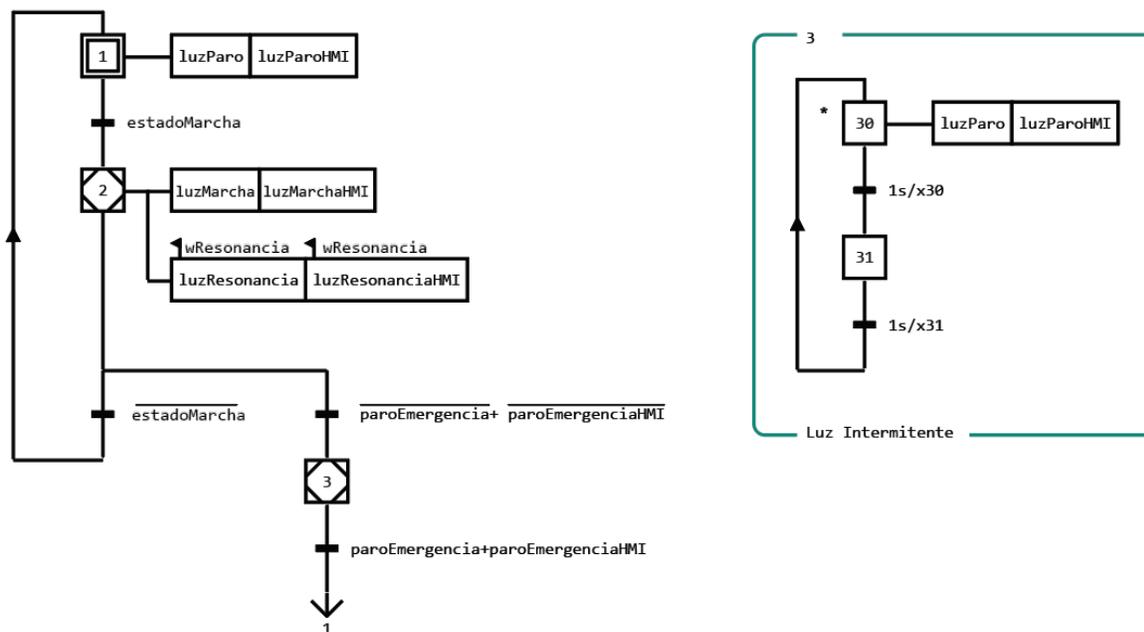


Figura 63

Graficet de la lectura de la variable de torsión

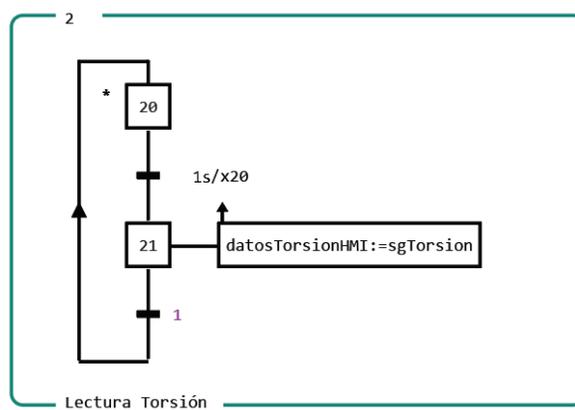
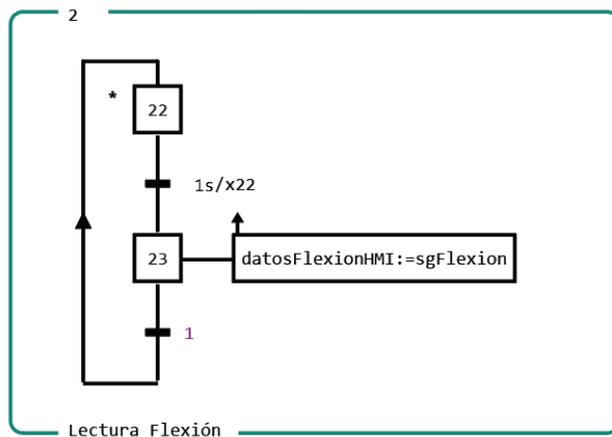
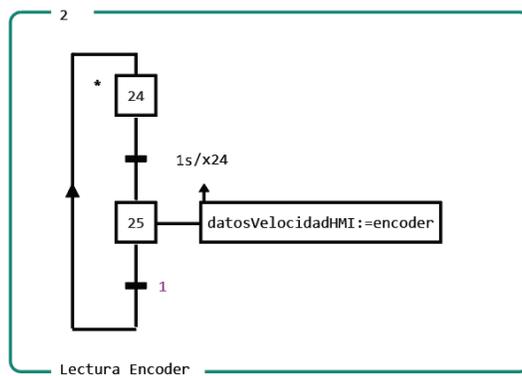


Figura 64*Graficet de la lectura de flexión***Figura 65***Graficet de la lectura de velocidad Angular***Conversión de Datos**

El presente sistema de adquisición de datos está fuertemente delimitado por los instrumentos de medición y los elementos transmisores involucrados con el tratamiento de las señales recibidas, por tanto, es necesario procesar los datos recopilados por los sensores de acuerdo a la variable estudiada y a la magnitud que se espera evaluar.

Los sensores instalados en el banco de pruebas de masas reciprocantes tienen la tarea de recoger información sobre la velocidad angular del cigüeñal y sobre las fuerzas de sacudimiento a las que se somete la barra de torsión.

- Velocidad Angular

El encoder incremental E6B2-CWZ3E es el sensor encargado destinado entregar al Controlador Lógico Programable la señal de los pulsos de alta frecuencia registrados durante el giro del eje del cigüeñal por medio de las entradas de conteo rápido que ofrece el PLC, X0 y X1. Las Salidas A y B de este sensor se conectan a las entradas mencionadas puesto que éstas están asociadas al contador rápido del registro C630 para alojar el conteo de pulsos de alta velocidad en esta dirección.

Para obtener una medida de la velocidad angular del cigüeñal se opera con el valor del conteo de pulsos registrado por C630.

Se realiza un muestreo con un período $T = 1s$, para guardar la cuenta de los pulsos registrados con un segundo de diferencia. El dato actual se guarda en el registro de datos D2 desplazado directamente desde el registro C630, mientras que el dato anterior se desplaza hacia el registro de datos D3. De esta forma, la diferencia entre los valores de estos dos registros nos entrega el valor de los pulsos registrados durante el último segundo. Esta diferencia se aloja en el registro de datos D4:

$$D2 \rightarrow \text{Estado Actual del Encoder}$$

$$D3 \rightarrow \text{Estado Anterior del Encoder}$$

$$D4 = D2 - D3 \text{ [pulsos/segundo]}$$

Con la magnitud encontrada, es posible realizar la conversión de pulsos por segundo a pulsos por minuto. Este dato se aloja en el registro de datos D5:

$$D5 = D4 \times 60 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{minuto}} \right]$$

A partir de la hoja de datos del Encoder utilizado, se sabe que la resolución de este equipo es de 1000 pulsos por revolución, de modo que es posible convertir la magnitud encontrada en D5 a Revoluciones por Minuto. Este dato se aloja en el registro de datos D6:

$$D6 = \frac{D5}{1000} \left[\frac{\text{revoluciones}}{\text{minuto}} \right]$$

- Deformación Unitaria de Flexión

Como se indicó anteriormente, la lectura de la deformación unitaria de flexión que sufre la barra de torsión se mide mediante galgas extensiométricas dispuestas en un puente completo de Wheatstone. Se utiliza un amplificador de tensión de carácter específico para la transmisión de señales de carga mecánica, el módulo JY-S60. El mencionado transmisor de tensión energiza el puente de Wheatstone, amplifica la señal recibida por el arreglo de resistencias y entrega una señal de 0 – 10V a la entrada analógicas del módulo XC- 2AD2DA-BD. La medida de voltaje recibida por el módulo analógico se aloja en el registro de datos ID1000.

Sobre el análisis mecánico realizado previamente, se sabe que la deformación unitaria se obtiene a partir de:

$$\varepsilon = \frac{V_o}{k * V_s}$$

Donde:

$V_s \rightarrow$ Voltaje de Alimentación del Puente de Wheatstone

$V_o \rightarrow$ Voltaje de Salida del Puente de Wheatstone

$k \rightarrow$ Constante de Galga

Notamos que el voltaje V_o corresponde al valor registrado en ID1000.

Sabemos que el voltaje de suministro para el puente completo es de $V_s = 10 [V]$, además, a partir de los datos técnicos de las galgas extensiométricas utilizadas en este caso se sabe que $k = 2.12$, por tanto, la deformación unitaria de flexión se determina como se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{ID1000}{21.2}$$

Dadas las limitaciones aritméticas del controlador lógico programable, es necesario realizar las operaciones con cantidades enteras. Por tanto, el dato de deformación unitaria de flexión se obtiene desplazando el valor de ID1000 hacia D0.

$$ID1000 \rightarrow D0 \rightarrow \text{Deformación unitaria por flexión}$$

En el registro D7, se multiplica a este dato por 10 y después de dividir el producto anterior entre 212 el resultado se aloja en el registro D8.

$$D7 = D0 \times 10$$

$$D8 = \frac{D7}{212}$$

- Deformación Unitaria de Torsión

Para este caso también se tiene un puente completo de Wheatstone, montado de tal forma que sea posible tomar medidas de torsión como se explicó en secciones anteriores. La particularidad de este puente de Wheatstone radica en que las cuatro galgas conectadas forman parte de un par de rosetas de deformación, por lo que se espera tener una constante de galga distinta al caso de flexión.

De igual forma, se utiliza el transmisor de tensión JY-S60 para energizar el puente y amplificar su señal de salida. Esta medida de voltaje recibida por el módulo analógico se aloja en el registro de datos ID1001.

Sobre el análisis mecánico realizado previamente, se sabe que la deformación unitaria se obtiene a partir de:

$$\varepsilon = \frac{V_o}{k * V_s}$$

Donde,

$V_s \rightarrow$ Voltaje de Alimentación del Puente de Wheatstone

$V_o \rightarrow$ Voltaje de Salida del Puente de Wheatstone

$k \rightarrow$ Constante de Galga

Para presentar este dato de deflexión en la interfaz humano – máquina, se encera y desplaza el valor de D8 para guardar en el registro D54 con un valor de centrado alrededor de 20, para facilitar su interpretación.

Notamos que el voltaje V_o corresponde al valor registrado en ID1001.

Sabemos que el voltaje de suministro para el puente completo es de $V_s = 10 [V]$, además, a partir de los datos técnicos de las galgas extensiométricas utilizadas en este caso se sabe que $k = 1.94$, por tanto, la deformación unitaria de flexión se determina como se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{ID1001}{19.4}$$

El dato de deformación unitaria de torsión se obtiene desplazando el valor de ID1001 hacia D1.

$ID1000 \rightarrow D1 \rightarrow$ Deformación unitaria por torsión

En el registro D9, se multiplica a este dato por 10 y después de dividir el producto anterior entre 194 el resultado se aloja en el registro D10.

$$D9 = D1 \times 10$$

$$D10 = \frac{D9}{212}$$

Para presentar este dato de deflexión en la interfaz humano – máquina, se encera y desplaza el valor de D8 para guardar en el registro D55 con un valor de centrado alrededor de 20, para facilitar su interpretación.

Definición de los requerimientos del ciclo de escaneo del programa

Se identifican los ciclos de operación de cada parte de la aplicación, en donde es preciso reconocer si existen ciclos continuos de trabajo u operaciones que son ejecutadas dentro de periodos de tiempo específicos según los requerimientos del problema de control y de la planta.

La estación de pruebas de masas reciprocantes tiene un régimen de trabajo de un máximo de cuatro sesiones de dos horas de operación cada una. Las sesiones corresponden a las prácticas de laboratorio de la materia de Mecanismos, lo cual implica que su activación sucede solamente al momento de iniciada la práctica, su operación dura el tiempo que tome el desarrollo de la misma, y el sistema de adquisición de datos se apaga y permanece inactivo hasta la siguiente sesión. Por tanto, es posible identificar que no existen restricciones o requerimientos respecto al tiempo de escaneo del programa para recopilación de datos y esto significa que el tiempo de escaneo de la secuencia propuesta es el mismo hallado por defecto mediante el software de programación de Xinje, definido en 27ms.

Configuración del sistema mediante definición de recursos, conexión entre programas y salidas / entradas físicas y asignación de bloques de función a las tareas

Se asignan las direcciones lógicas y tipos de datos pertinentes, se asocian con las entradas y salidas físicas para verificar la necesidad de mapeados y asegurar la independencia entre hardware y software, se identifican los programas que pertenecen a cada recurso y se reconocen las tareas específicas asociadas a cada bloque de función con el objetivo de garantizar modularidad y posteriormente facilitar el cableado durante la instalación.

En las tablas mostradas a continuación se enlistan las direcciones lógicas correspondientes a cada entrada y salida, física y digital, así como también se identifican las marcas de memoria utilizadas como contactos auxiliares para la escritura del código de programación.

Tabla 25

Definición de entradas booleanas y analógicas

Entradas			
Variable	Tipo de Dato	Dirección Lógica	Descripción
paroEmergencia	Bool	X2	Seta de Paro de Emergencia
sgFlexion	Real	ID1000	Señal de Galgas extensiométricas de torsión
sgTorsion	Real	ID1001	Señal de Galgas extensiométricas de flexión
encoder	Real	C630	Encoder de la velocidad angular del cigüeñal

Tabla 26

Definición de salidas digitales

Salidas			
Variable	Tipo de Dato	Dirección Lógica	Descripción
luzParo	Bool	Y2	Luz piloto verde que indica el estado encendido del motor
luzResonancia	Bool	Y3	Luz piloto roja que indica cuando el sistema está detenido
luzMarcha	Bool	Y4	Luz piloto ámbar que indica cuando el sistema está próximo a la resonancia
variadorFrecuencia	Bool	Y5	Contacto de Alimentación del Variador de Frecuencia

Tabla 27

Definición de entradas virtuales

Entradas Virtuales			
Variable	Tipo de Dato	Dirección Lógica	Descripción
encendidoHMI	Bool	M0	Pulsador Virtual de Inicio de Lectura de Datos
paroHMI	Bool	M1	Pulsador Virtual de Paro de Lectura de Datos
paroEmergenciaHMI	Bool	M2	Interruptor de Paro de Emergencia de la Pantalla HMI

Tabla 28*Definición de salidas virtuales*

Salidas Virtuales			
Variable	Tipo de Dato	Dirección Lógica	Descripción
luzMarchaHMI	Bool	M3	Luz piloto que indica el estado encendido del motor
luzParoHMI	Bool	M4	Luz piloto que indica cuando el sistema está parado
luzEmergenciaHMI	Bool	M5	Luz piloto intermitente que indica el estado de paro de emergencia
luzResonanciaHMI	Bool	M6	Luz piloto que indica cuando el sistema está próximo a la resonancia

Tabla 29*Identificación de Memorias Auxiliares*

Marcas de Memoria Auxiliares			
Variable	Tipo de Dato	Dirección Lógica	Descripción
estadoReposo	Bool	M7	Marca que indica cuando el sistema está detenido
estadoMarcha	Bool	M8	Marca que indica cuando el sistema está en marcha
estadoEmergencia	Bool	M9	Marca que indica cuando el sistema está en estado de emergencia
intermitencia	Bool	M10	Marca de activación intermitente de 1 Hz
marchaMotor	Bool	M11	Indicador del estado encendido del motor

Diseño y programación de la Interfaz Humano Máquina

Para la construcción de la interfaz de comunicación entre el usuario y el sistema de adquisición de datos del sistema de balanceo de masas reciprocantes se hace uso de la guía GEDIS para el desarrollo de interfaces ergonómicas.

La guía GEDIS, según (Filali-Yachou, González-González, & Lecuona-Rebollo, 2015), consiste en un compendio de herramientas, sugerencias y recomendaciones generadas a partir de la combinación de criterios de Ingeniería en Sistemas y fundamentos de Ergonomía, para

plantear un acercamiento metodológico hacia el desarrollo, mantenimiento y mejora de sistemas de control industrial de alta eficiencia. La aplicación técnica de esta guía resulta en la asimilación de múltiples pautas e indicaciones sobre aspectos específicos del problema de control que se ven reflejados en la interfaz como detalles que pueden ser corregidos o mejorados, además, la mencionada guía provee lineamientos con los que es posible realizar evaluaciones continuas del estado actual de la interfaz y, por ende, es posible localizar falencias y atender la necesidad de mejoras.

Arquitectura de la Interfaz

Refiriéndonos al sistema de adquisición de datos de balanceo de masas reciprocantes del laboratorio de mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas como el problema de control en cuestión, es posible reconocer, mediante una evaluación superficial de la naturaleza, condiciones y requerimientos del proceso, que enfrentamos la necesidad de monitorear la velocidad angular del motor eléctrico y así como el esfuerzo flector y el esfuerzo torsor que ejerce el mecanismo sobre la barra de torsión, además, sería conveniente presentarle esta información al usuario mediante gráficos de tendencia para cada una de las configuraciones del mecanismo de balanceo de masas reciprocantes.

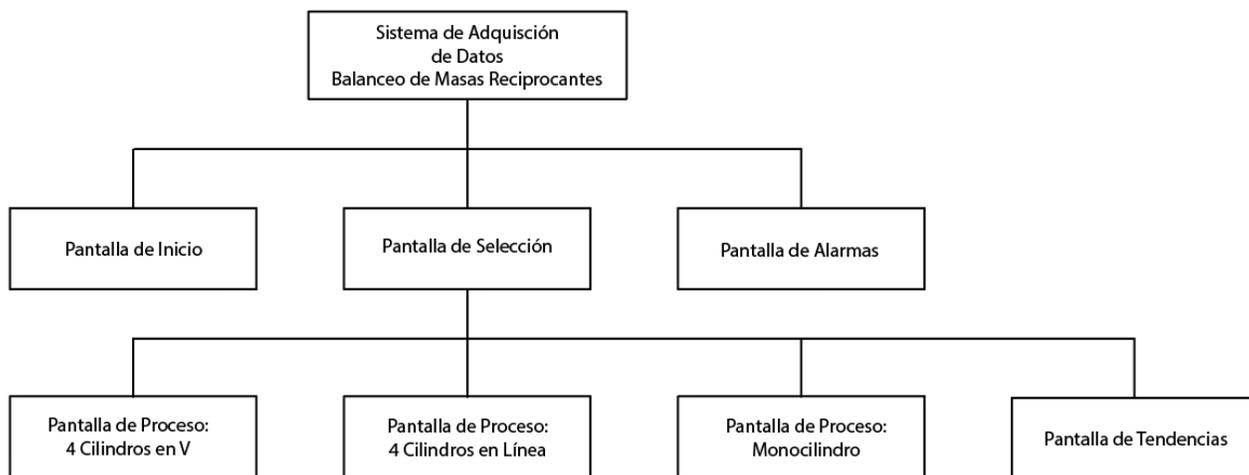
La arquitectura de la presente interfaz procede a ser planteada alrededor de las tres pantallas de proceso necesarias para el monitoreo de las variables mencionadas en las tres configuraciones del mecanismo y una pantalla de tendencias para la presentación gráfica de los datos recopilados de la configuración actual.

Para adecuar la presentación de las pantallas descritas en el párrafo anterior, es necesario incluir una pantalla de selección mediante la cual será posible dirigirnos a la pantalla de proceso correspondiente a la configuración que se encuentre instalada en ese momento. También se añade una pantalla de alertas y alarmas y una pantalla de inicio, para la cual no es necesario solicitar información de identificación de usuario debido a que el sistema será de uso

académico. En la figura Figura 66 a continuación se representa la arquitectura de la interfaz como se ha descrito hasta ahora.

Figura 66

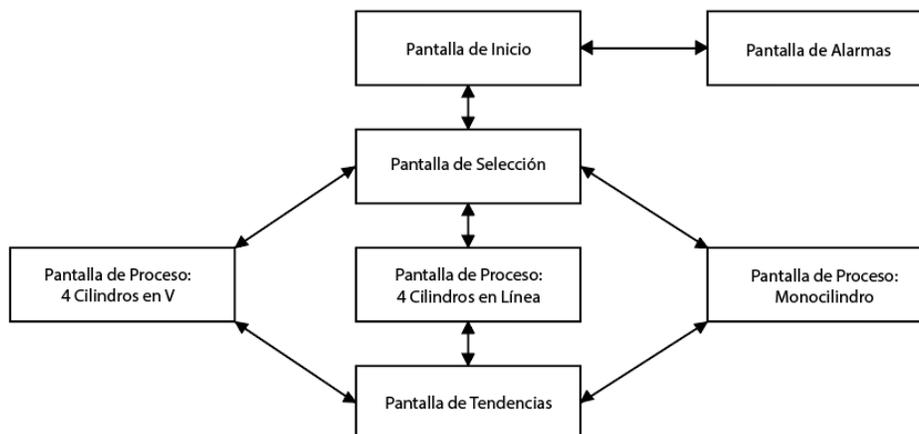
Arquitectura de navegación de la HMI



Navegación

Con el objetivo de facilitar la interacción del usuario con la interfaz, es necesario establecer un mapa de navegación que favorezca la presentación del proceso de adquisición de datos y garantice la accesibilidad a esta información.

Como se muestra en la Figura 67 la navegación a través de la interfaz gira en torno a las pantallas de proceso, ya que es posible acceder a estas pantallas desde la pantalla de selección, mientras que el resto de pantallas ofrecen la posibilidad de múltiple acceso entre ellas, permitiendo el rápido alcance de las pantallas de inicio, selección, alarmas y tendencias.

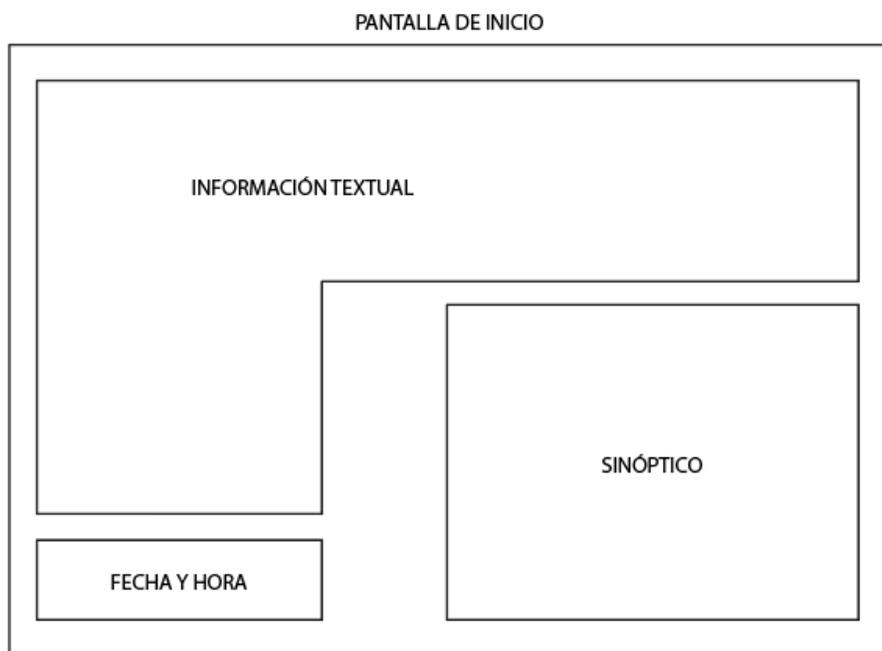
Figura 67*Diagrama de Navegación de la HMI****Distribución***

Las pantallas, como se muestran en la Figura 68a la Figura 72 a continuación, se han estructurado de tal forma en que se maximice la información gráfica presentada, ubicando en el área central de la pantalla los diagramas, figuras y sinópticos representativos del proceso. Los botones de navegación se localizan en la parte inferior de todas las pantallas para facilitar el movimiento a través de la interfaz.

Las luces indicadoras se ubican en la parte superior de la pantalla para asegurar su visibilidad, mientras que las pantallas de proceso incluyen los botones de comando en la esquina inferior izquierda. También se dispone de una seta virtual como pulsador de emergencia con su respectiva luz indicadora en la esquina superior izquierda.

Figura 68

Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de inicio

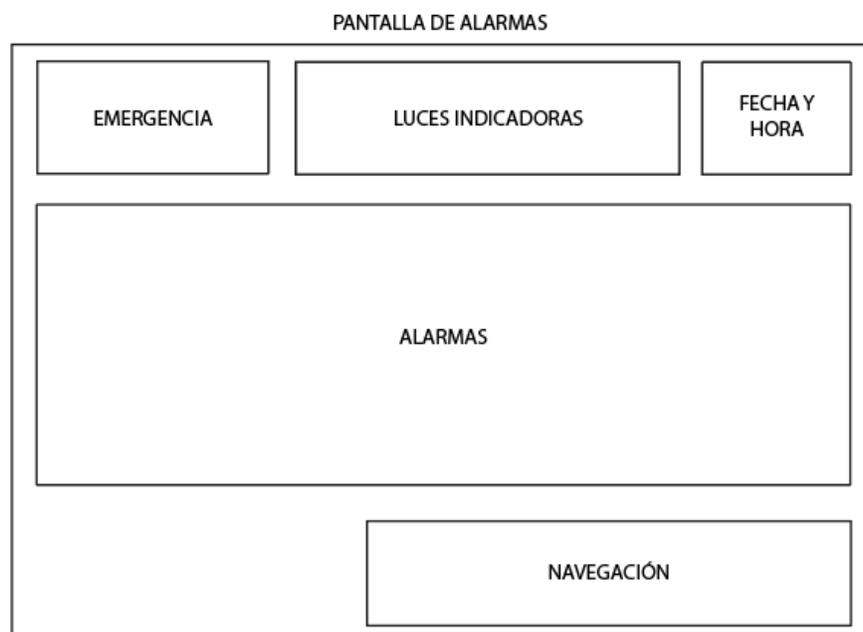
**Figura 69**

Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de selección



Figura 70

Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de alarmas

**Figura 71**

Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de tendencias

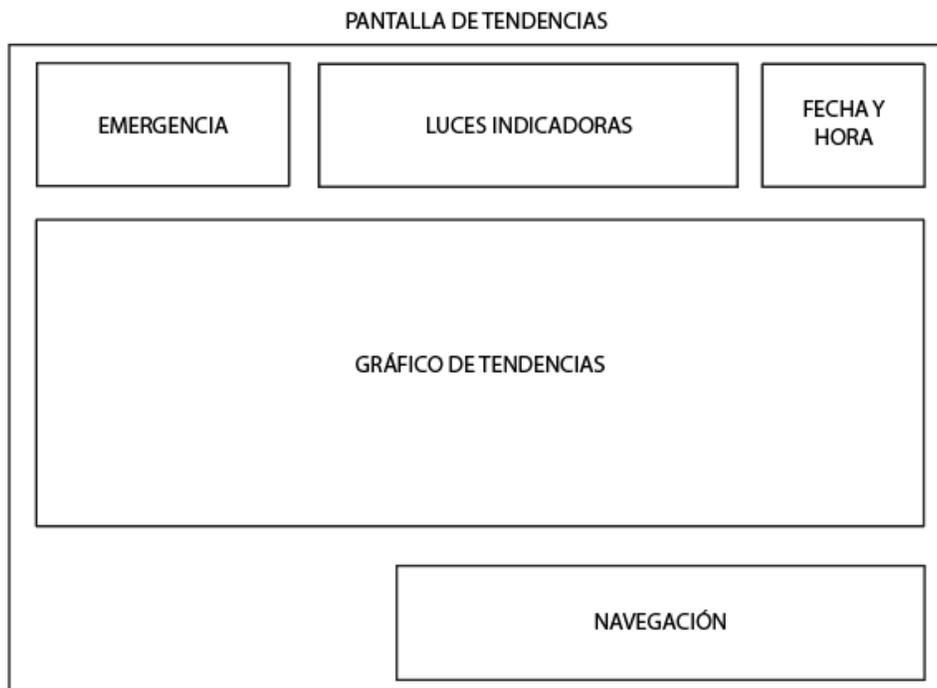
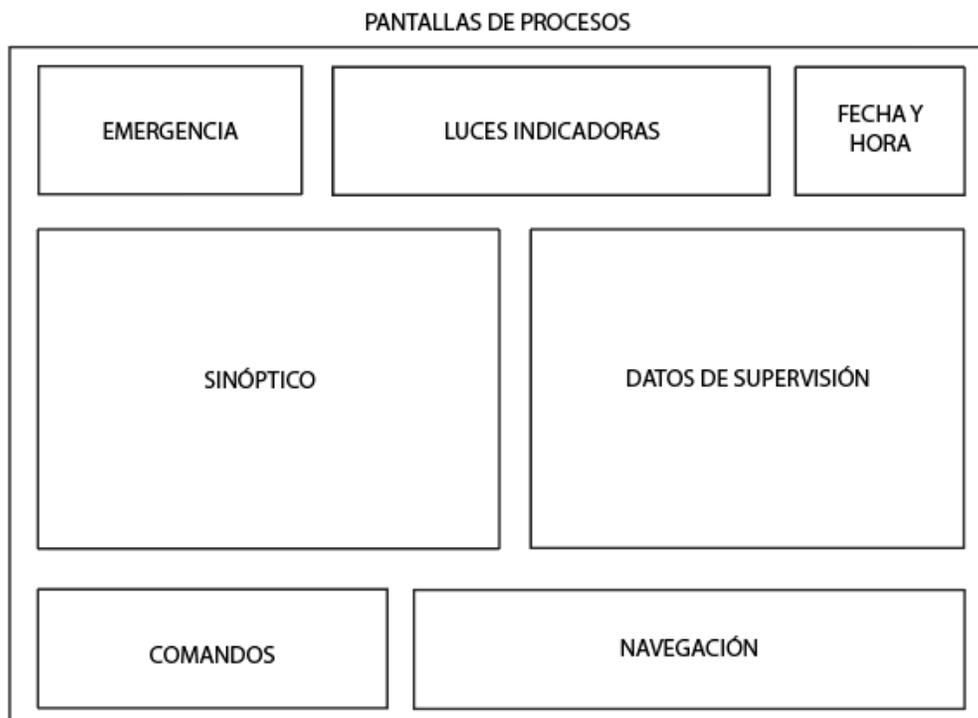


Figura 72

Esquema de distribución de componentes de la HMI pantalla de procesos



Resultados

En concordancia con las recomendaciones provistas por la guía GEDIS, las pantallas resultantes, que se muestran continuación desde la Figura 73 a la Figura 79, cumplen con una eficiente distribución en el espacio disponible, un uso de colores opacos para evocar profesionalidad y evitar distracciones con colores muy llamativos, una selección de fuente y tamaño de letra legibles y distinguibles, así como un gran aprovechamiento del espacio para incluir información visual importante para el proceso.

Pantalla de inicio:

Figura 73

Pantalla de Inicio HMI



Figura 74

Pantalla de selección HMI



Figura 75

Pantalla de alarmas HMI

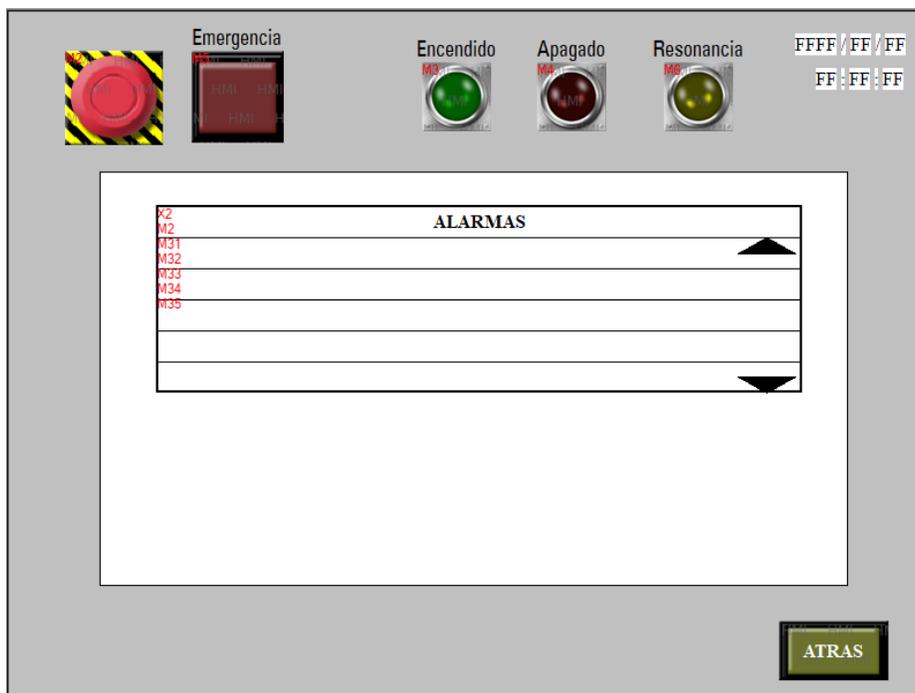


Figura 76

Pantalla de tendencias HMI

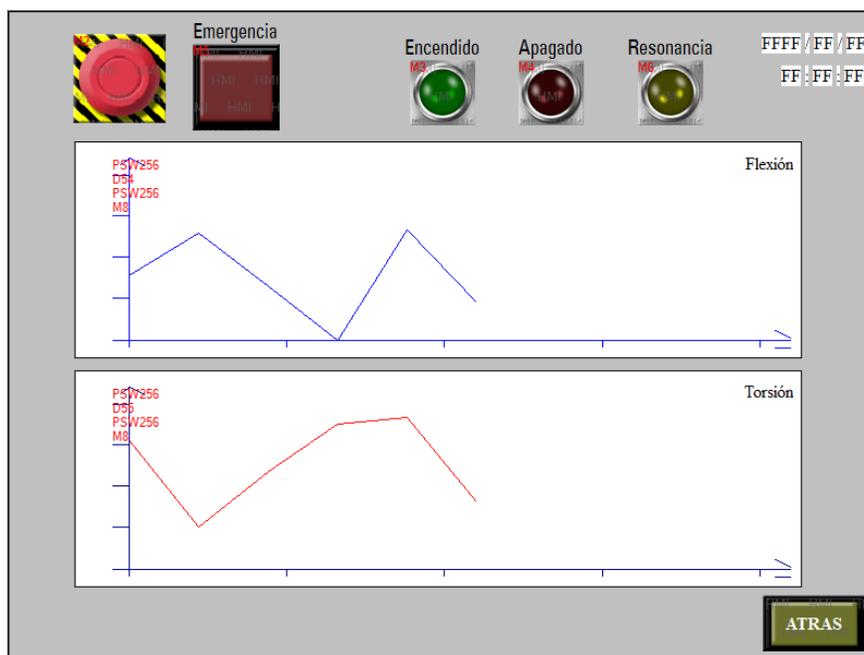


Figura 77

Pantalla de proceso cilindros en V

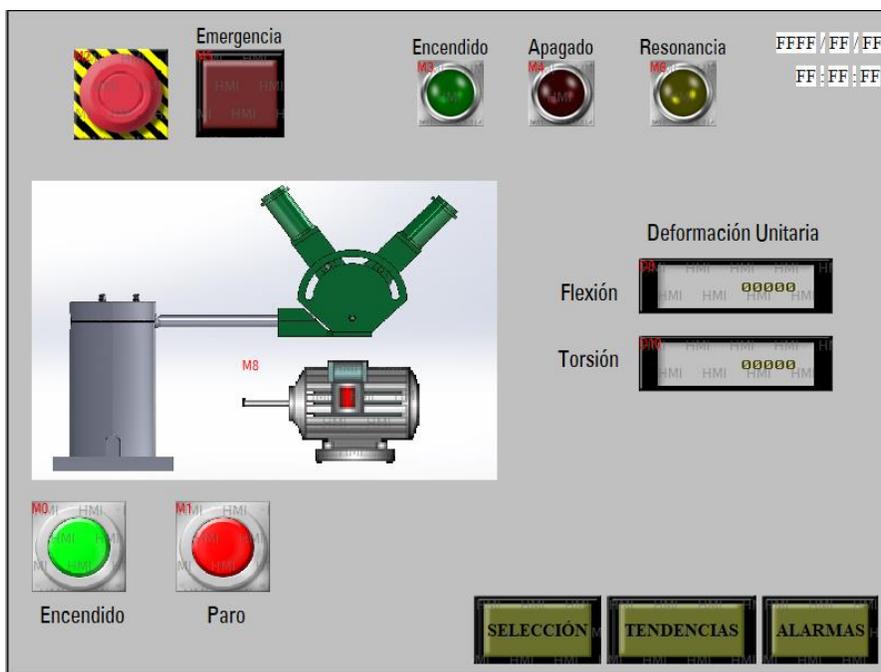


Figura 78

Pantalla de proceso 4 cilindros en línea

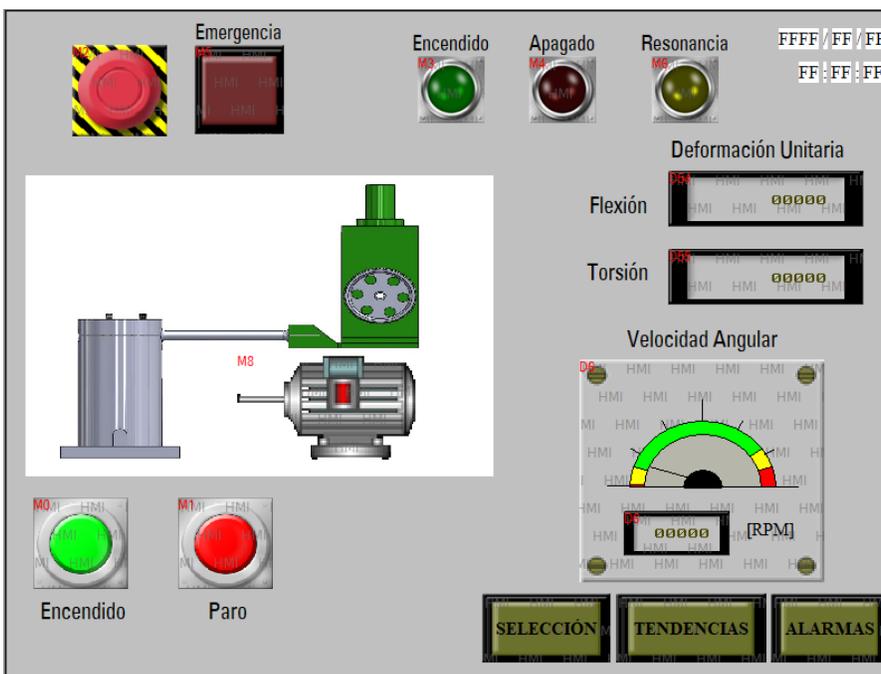
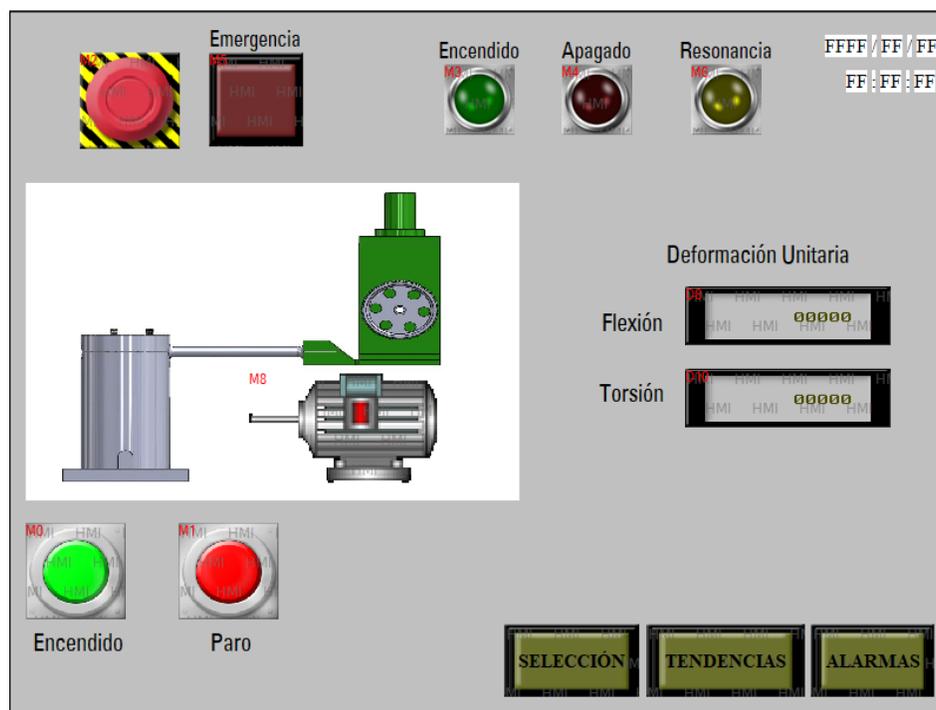


Figura 79

Pantalla de proceso monocilindro



Diseño del tablero eléctrico de control

El diseño del tablero de control se realizó considerando todos los elementos elegidos, y siguiendo las normas de diseño considerando los siguientes elementos:

Elementos de protección

Fusibles

El fusible es un elemento de protección de sobrecargas y cortocircuitos de las líneas eléctricas, es necesario dimensionar el correcto valor de intensidad de corte del fusible de acuerdo con las características del circuito y considerando la intensidad máxima admisible del conductor, y la sobrecarga transitoria que puede soportar el conductor.

Ejemplo de Calculo Fuente de 24 VDC

Intensidad máxima línea monofásica

$$I = \frac{P}{U * \cos(\varphi)} = \frac{500}{110 * 1} = 0.1A = 4.5 A$$

La potencia corresponde a la potencia máxima que puede consumir y alimentar la fuente 500 W de voltaje de 24 V DC, al no incluir elementos inductivos $\cos(\varphi) = 1$.

La corriente nominal del fusible debe satisfacer la expresión

$$I_b < I_n < I_z$$

Donde I_b : es la corriente de diseño del circuito

I_n : es la corriente nominal del fusible

I_z : Corriente máxima admisible por el conductor protegido

El conductor que alimenta a la fuente de voltaje es AWG14, su corriente máxima a un máximo de 60° C es:

$$I_z = 15 A$$

La corriente nominal del fusible debe estar en un valor entre 4.5 A y 15 A. Sin embargo, existe una segunda condición para determinar la corriente de corte del fusible, que considera la capacidad de los conductores a soportar sobrecargas transitorias sin perder sus propiedades de un 145% de la corriente máxima admisible térmicamente, y es sobre este rango de corriente que el fusible debe actuar, permitiendo que el circuito no corte la alimentación a los componentes que producen esta sobrecarga transitoria. El fusible elegido es de 6 A.

$$I_f \leq 1.45 * I_z$$

$$I \leq 1.45 * 15 = 21.55 A$$

Tabla 30

Fusibles elegidos

Elementos	Calibre AWG	I_z	I_b	$1.45 * I_z$	I_f
Alimentación al PLC	14	15	2	21,75	4
Alimentación a la fuente de Voltaje	14	15	4,5	21,75	6

Disyuntores

Los disyuntores permiten proteger a los elementos del circuito de sobrecargas o sobrecorrientes, el disyuntor debe ser monopolar y debe satisfacer la expresión:

$$I_n = 1.25 I_b$$

Para el caso de la fuente de 24 VDC

$$I_n = 1.25 * 4.5 = 5.625 A$$

El disyuntor elegido es de 6 A.

Tabla 31

Disyuntores monofásicos

Disyuntor monofásico		
	Modelo	Easy9, 1P, 6 A, B curve
	Voltaje de operación	230 V AC 50/60 Hz
	Número de polos	1
	Corriente nominal	6 A
	Capacidad de interrupción	4500 A Icn a 230 V AC
	Montaje	Riel DIN

Nota. Adaptado de *Easy Line Schneider*, por *Schneider Electric*, 2022,

(<https://schneiderelectriceasyline.com/index2.html>)

Elementos de alimentación de potencia

Fuente de 24 V DC

Para el dimensionamiento de la fuente de alimentación se considera todos los elementos que consumen corriente en el sistema, que se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32

Consumo de corriente de los elementos del sistema de control a 24 VDC

Fuente de 24 VDC		
Elemento	Cantidad	Consumo [mA]
Relés	3	1500
Relé de estado sólido	1	500
Módulos de galgas extensiométricas	2	1000
HMI	1	500
Encoder	1	100
Luces piloto	3	60
Total		3660

El proyecto puede ser usado como base para proyectos futuros, se debe considerar el número de entradas y salidas disponibles del PLC, en este caso 10 entradas y 12 salidas libres, para alimentar a nuevos sensores, elementos de control e indicadores la fuente de voltaje deberá poder satisfacer la demandas de potencia de estos nuevos elementos.

El consumo total de corriente es de 3.35 A, el PLC puede ser usado para controlar un proyecto de aproximadamente tres veces mayor demanda de potencia en el circuito de control , usaremos un facto $n=4$ para el dimensionamiento.

$$I_t = 3.66 * n = 3.66 * 4 = 14.64 [A]$$

La fuente disponible en el mercado con características semejantes es de 500 W, 20.8 [A] de corriente nominal, sus características se exponen en la Tabla 33.

Tabla 33*Fuente de poder 24 V DC*

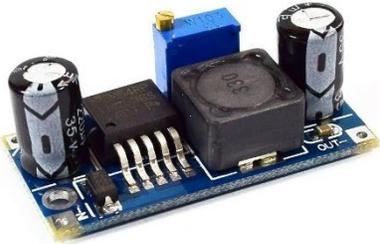
Fuente de poder 24 V		
	Modelo	S-250-24
	Voltaje de entrada	115-220V AC 50/60 Hz
	Voltaje de salida	24 V DC
	Corriente de salida máx	20 A
	Potencia máxima	500 W
	Eficiencia de conversión	83%

Nota. Adaptado de *Naylamp*, por *Wode*, 2021, (<https://naylampmechatronics.com/fuentes-switching-ac-dc/627-fuente-de-alimentacion-conmutada-acdc-250w-5v-50a-wode.html>)

Regulador de Voltaje DC

Es necesario el uso de un módulo regulador de voltaje de corriente continua, debido a que el voltaje de operación del encoder E6B2-CWZ3E es de 12 V, no es conveniente usar una fuente independiente para un solo elemento, para ello se escogió el módulo LM2596 que permite regular el voltaje dentro de un amplio rango de entrada y salida mediante potenciómetro, sus características se muestran en la tabla Tabla 34.

Tabla 34*Regulador de voltaje*

Reguladores de voltaje DC		
	Modelo	LM2596
	Voltaje de entrada	4.5 V a 40 V DC
	Voltaje de salida	1.23 V a 37 V DC ajustable
	Corriente de salida máx	3 A
	Potencia máxima	25 W
	Eficiencia de conversión	92%

Nota. Adaptado de LM2596, por *Grupo Electrostore*, 2019, (<https://grupoelectrostore.com/shop/modulos-y-shields/reguladores-de-voltaje/modulo-reductor-de-voltaje-3a-lm2596-ajustable-step-down-buck/>)

Elementos de maniobra y control

Relés

Los relés son elementos de control que funcionan como interruptores, permiten energizar el circuito de las luces indicadores, mediante la señal de salida del PLC.

Tabla 35

Relés

Relés 24 V DC		
	Modelo	CAMSCO MY4
	Voltaje de operación	24 V DC
	Capacidad de contacto	28V DC 5 A 220V AC 3 A
	Resistencia de contacto	<50mΩ
	Ciclos de servicio	10 000 000
	Dimensiones	27.6x21.5x34

Nota. Adaptado de Electro TecnicMotor, por *CAMSCO*, 2020, (<http://www.etm-ec.com/images/images/Productos/>)

Luces Indicadoras

Permiten al operador tener una representación gráfica y fácil de identificar del estado en que se encuentra la máquina.

Tabla 36*Luces indicadoras*

Luz piloto		
	Modelo	AD16/22 D/S
	Voltaje nominal	24 V DC
	Color	Rojo, verde y amarillo
	Corriente	20 mA
	Contacto	NA
	Montaje	Tablero

Nota. Adaptado de Ferrelectrica, por *LEXO Electric*, 2023,

(<https://www.ferrelectrica.cl/product/luz-piloto-led>)

Seta de emergencia

Permitirá al usuario detener el proceso en caso de existir un evento que ponga en riesgo su seguridad, la integridad de la máquina o la de un tercero.

Tabla 37*Pulsador de emergencia*

Pulsador tipo Z		
	Modelo	M 22 – D
	Voltaje nominal	24 VDC
	Número de contactos	NA
	IP	IP66
	Norma adicional	EN/IEC 60947-5-1
	Color	Rojo

Nota. Adaptado de Serie S2ER, por Dectronic, 2021, (<https://www.ferrelectrica.cl/product/luz-piloto-led>)

Cableado

Los conductores fueron seleccionados de acuerdo a la corriente del circuito que alimentan, la longitud del cable a utilizar y el voltaje de alimentación, todos los datos de los conductores utilizados se muestran en la Tabla 38.

Diseño y selección de envoltentes y elementos de cableado

Figura 80

Distribución y dimensiones de los elementos del tablero eléctrico de control

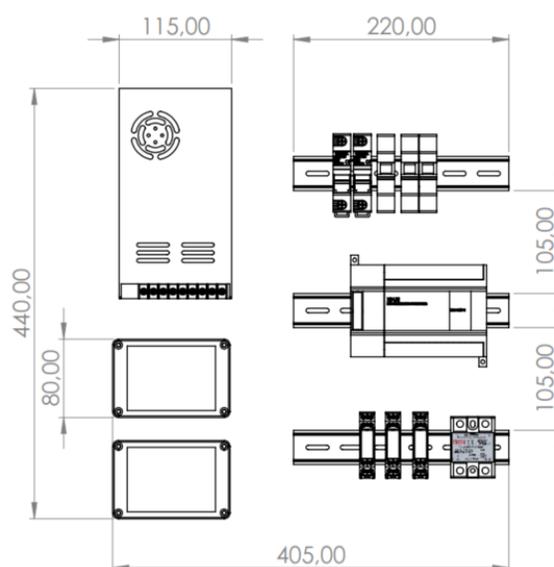


Figura 81

Distribución de canaletas ranuradas en el tablero de control

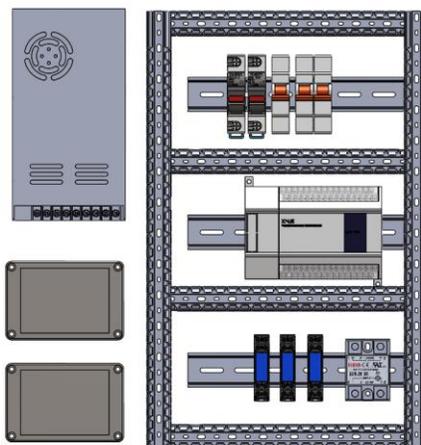
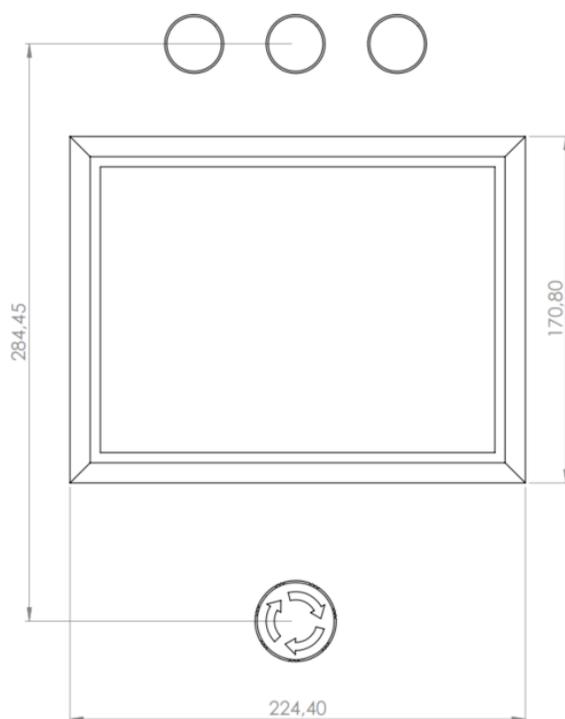


Figura 82

Distribución y dimensiones de los elementos indicadores y HMI

**Figura 83**

Dimensiones de la envolvente

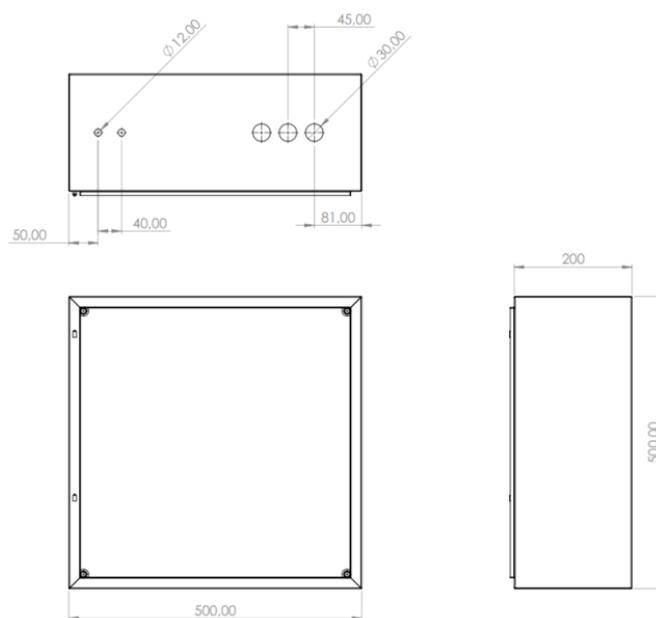
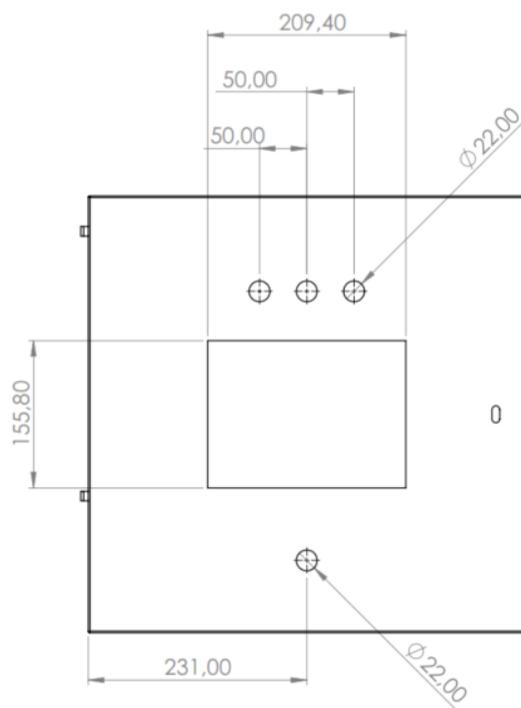


Figura 84

Dimensiones de la Tapa y soporte de elementos indicadores y HMI

**Figura 85**

Diseño final del tablero de control vista interior

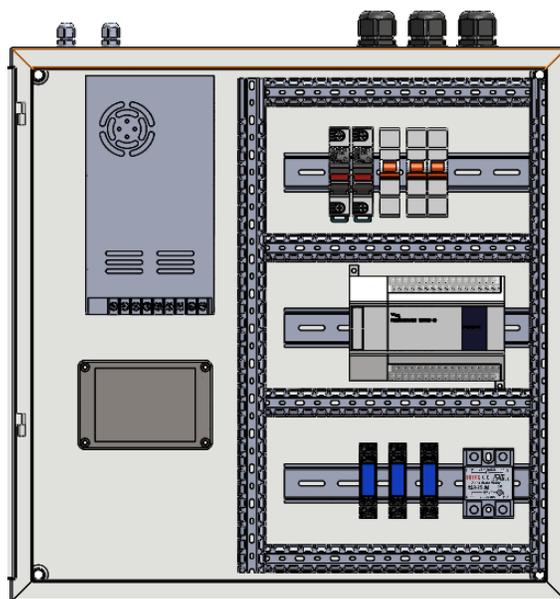
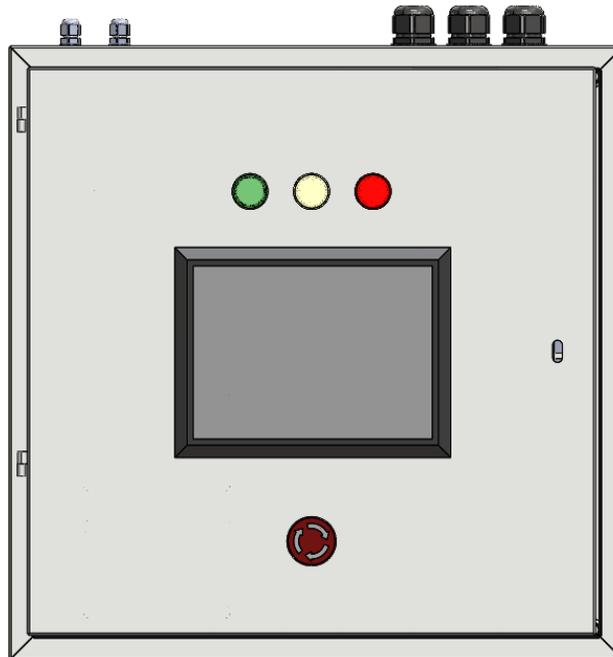


Figura 86*Diseño final del tablero de control vista exterior***Cableado de la Fuente de Potencia AC/DC**

En función de la caída de tensión, la sección del cable adecuado para el circuito debe satisfacer la ecuación:

$$S = \frac{2 * L * I * \text{Cos}\varphi}{\Delta U * \gamma_{\theta}}$$

Donde:

S : Sección del cable en mm²

L : longitud en metros

I : Intensidad prevista de la línea[A]

$\text{Cos}\varphi$: Factor de potencia de la carga

ΔU : Caída de tensión máxima permitida en la línea

U : Tensión de la línea

γ_{θ} : Resistividad

Para la fuente de potencia AD/DC la corriente es de $I = 4.5[A]$, y la caída de tensión máxima permitida según los datos técnicos de la fuente es %

$$\Delta U = \frac{110}{100} 5\% = 5.5$$

La longitud del cable es de 5m y al no alimentar elementos inductivos el factor de potencia es , los cables a utilizar serán cables de cobre flexibles con rebubrimiento aislante de PVC, cuya conductividad es de $\gamma_{\theta} = 5.96$.

Calculamos:

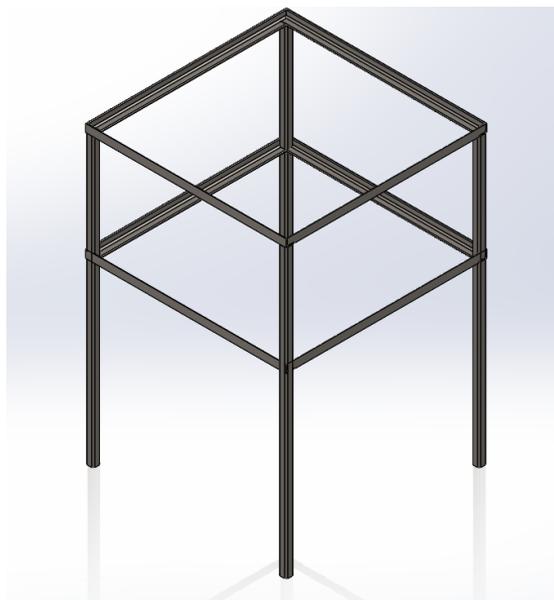
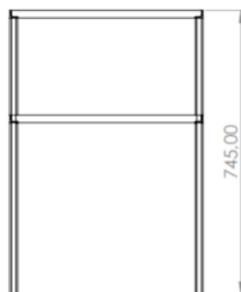
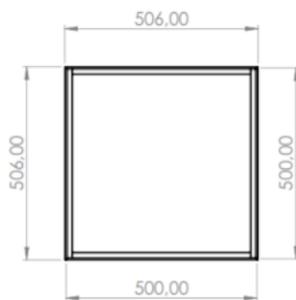
$$S = \frac{2 * 5 * 4.5 * 1}{5.5 * 5.96} = 1.3727mm^2$$

Esto corresponde al conducto AWG 14 con sección de $S = 1.628 mm^2$, se debe comprobar que el cable admita la corriente de operación, en este caso la corriente nominal del conductor es de 15 [A].

Tabla 38

Conductores del tablero de control

Elementos	I Máx de los elementos	Longitud	Caída de tensión permisible	Sección calculada	Calibre AWG	Sección del cable AWG	I máx del cable
Alimentación al PLC	2	5	5	0,61012 8127	14	1,63	6
Alimentación a la fuente de Voltaje	4,5	5	5	1,37278 8286	14	1,63	6
Circuito de control 24 V	1	10	2	0,61012 8127	18	1,024	2,5
Luces indicadoras	1	4	2	0,24405 1251	18	1,024	2,5
HMI	1	4	5	0,24405 1251	18	1,024	2,5
Motor	1,8	6	5	0,65893 8377	14	1,63	6

Diseño de mesa de soporte**Figura 87***Mesa de soporte del tablero de control***Figura 88***Dimensiones de la mesa de soporte del tablero de control*

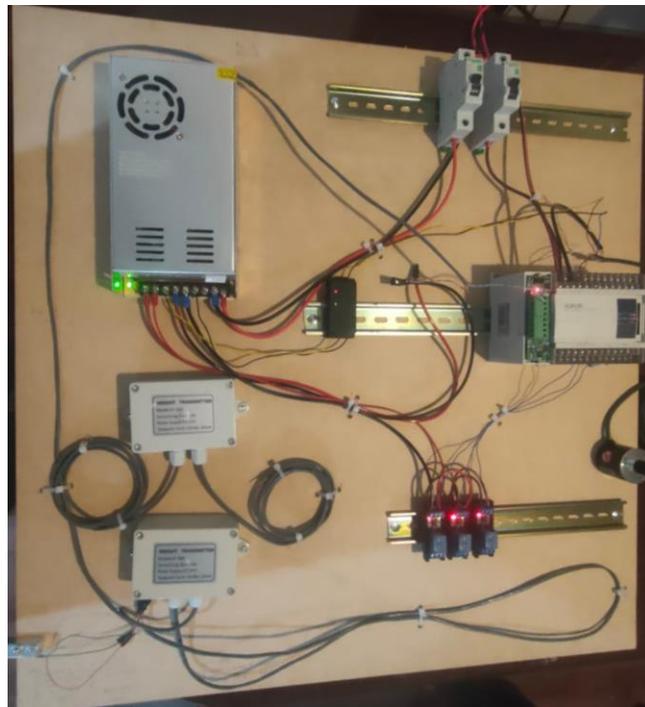
Construcción y Montaje del Sistema

Construcción del Tablero Eléctrico y soporte de HMI

Para la construcción del tablero se realizó un tablero preliminar para comprobar el correcto funcionamiento de los componentes y la programación del PLC, se muestra en la Figura 89.

Figura 89

Tablero eléctrico de control preliminar



Proceso de ensamble y montaje del tablero eléctrico

La envolvente del tablero se realizó en tol de acero de 2 mm de espesor, de acuerdo a las medidas de diseño, el tablero cuenta con un doble fondo para la correcta sujeción y aislamientos de los componentes, se realizaron los cortes para la ubicación de las luces indicadoras, HMI y pulsador de emergencia.

Figura 90

Construcción de la envolvente del tablero de control

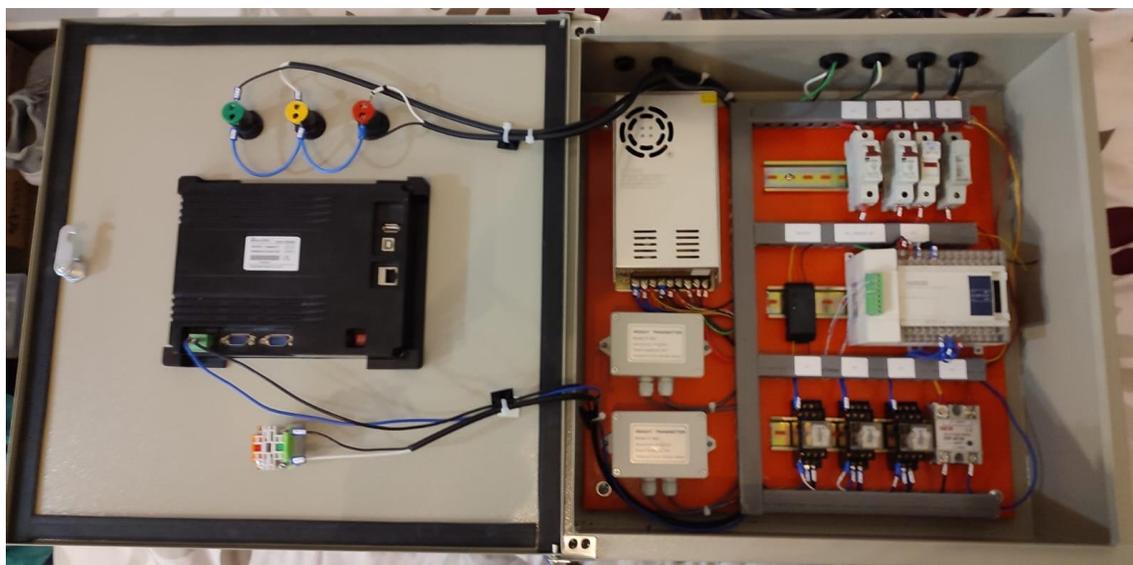
**Figura 91**

Tablero de control vista exterior



Figura 92

Tablero de control vista interior

**Figura 93**

Cableado y etiquetado de cables

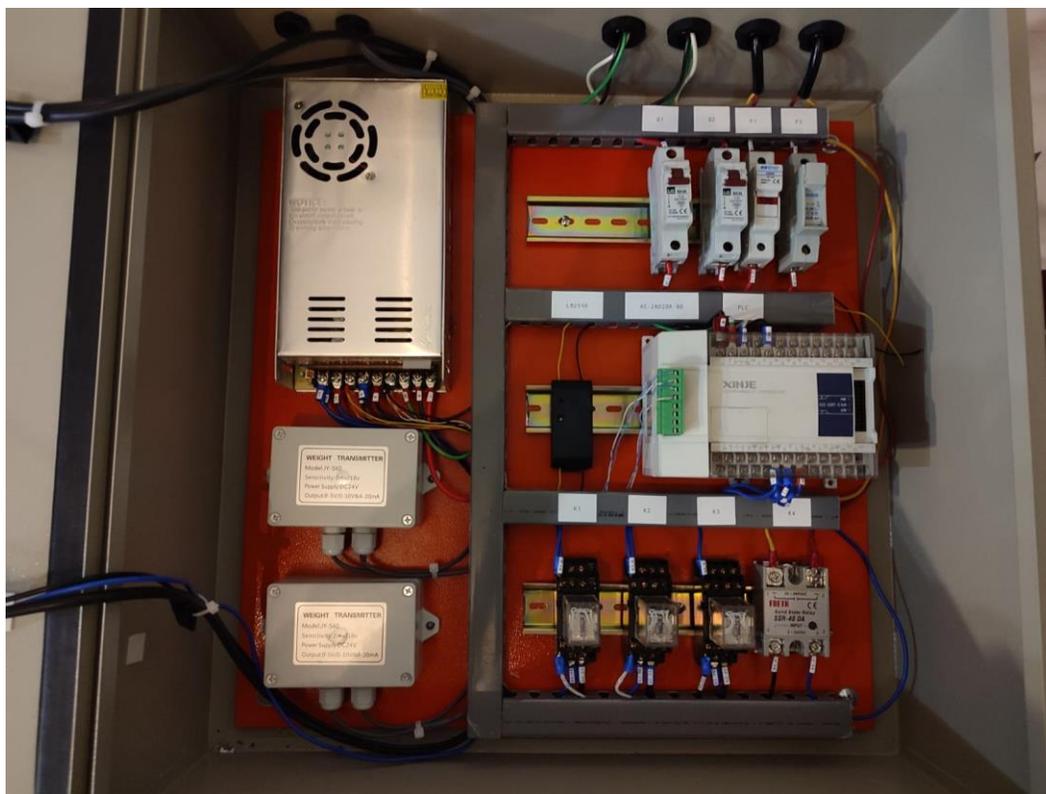


Figura 94

Cableado y etiquetado de cables de elementos indicadores y HMI



Montaje de Galgas Extensiométricas

Estado de la barra previo al montaje de galgas extensiométricas

La barra en voladizo del sistema contaba con dos medios puentes de galgas extensiométricas para medir flexión y torsión respectivamente, no contaba con galgas de compensación de temperatura, las constante de estas galgas era $k = 2 \cdot 0.65$,

Figura 95

Galgas extensiométricas previo a cambio



Las galgas no estaban en condiciones de medir la deformación correcta ya que presentaban golpes en la lámina, es decir, la rejilla activa de alambre de la galga tenía deformaciones en precarga, el eje fue pintado y por efecto del tiempo la pintura se desprendió en conjunto con la protección a alrededor de la galga; en una de las galgas del puente de torsión la conexión estaba en circuito abierto.

Figura 96

Galgas extensiométricas de torsión previo a cambio



Las galgas no contaban con la protección adecuada para mantener las propiedades de la galga y evitar que altas temperaturas, corrosivos o golpes.

Figura 97

Galgas extensiométricas de flexión previo a cambio



Preparación de la superficie

La superficie de la barra se preparó para obtener mediciones lo mas cercanas a la realidad, el material debe estar completamente en contacto con la lamina de la galga para transmitir las deformaciones, para ello se lijó la galga con ayuda del torno y lijas al agua, se usó lijas grano 600, 1000, 1200, 1500.

Figura 98

Lijado de la barra en el torno



Finalmente, para eliminar las señales de la orientación del lijado se uso pasta de pulir para dejar un mejor acabado en la superficie de la barra.

Figura 99

Superficie de la galga preparada



Aplicación y pegado de galgas

Este proceso se llevó a cabo en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Figura 100

Proceso de pegado de galgas extensiométricas



Para pegar las galgas se usó el torno para dividir la sección transversal del cilindro en cuatro cuadrantes a 90°, y pegar las galgas en la ubicación correcta.

Figura 101

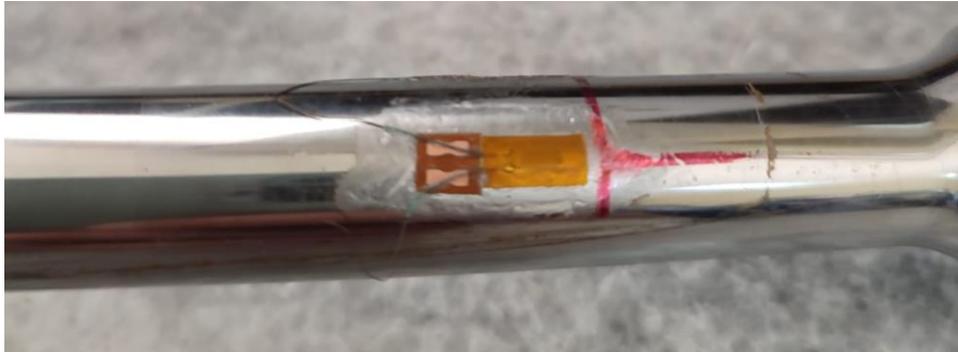
Ubicación de las galgas en la barra en voladizo con el torno



Se limpió la superficie de la barra con alcohol y se pegó la galga un adhesivo de secado instantáneo resistente a temperatura entre -50°C y +120°C, además según la norma EN204-D3 es resistente al gua pudiendo soportar >100 ciclos de exposición con abrasión.

Figura 102

Galga extensiométrica de flexión pegada



El adhesivo además de la lámina de la galga pegó los cables que salen de los terminales de la galga, evitando que se arranquen o que la soldadura presente daños.

Figura 103

Galgas extensiométricas y cables pegados en la barra

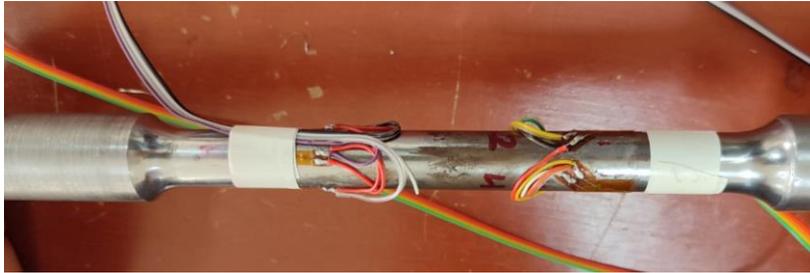


Soldadura de conductores y protección de las galgas extensiométricas

Los cables usados para el puente de Wheatstone son flexibles calibre AWG 22, son adecuados para alimentar y recibir la señal de retorno, y permiten soldar fácilmente las conexiones del puente.

Figura 104

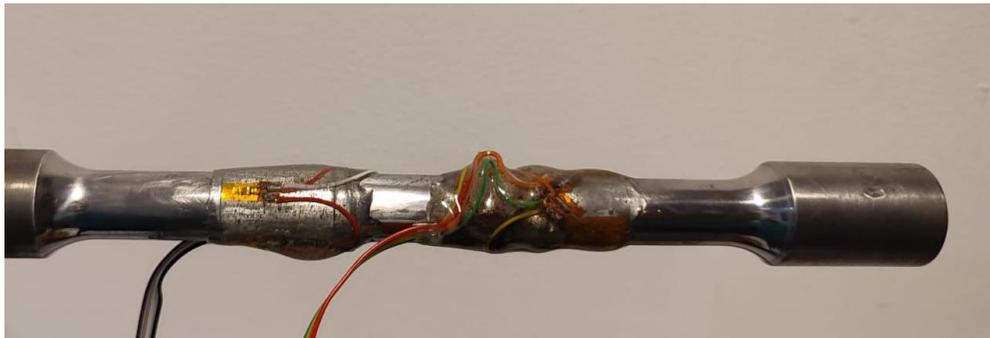
Soldadura de cables de las galgas extensiométricas



Para proteger las galgas de golpes, temperatura, humedad, y demás daños físicos se usó un adhesivo epóxico transparente para proteger las láminas de las galgas y los cables, el adhesivo es resistente a temperatura de hasta 80°C, tiene una alta durezza final.

Figura 105

Galgas extensiométricas montadas en la barra en voladizo



Montaje de Encoder

Para el montaje del encoder nos ayudamos de la construcción original de la máquina, es decir, no se realizó cambio significativos que puedan afectar al comportamiento o funcionamiento del equipo.

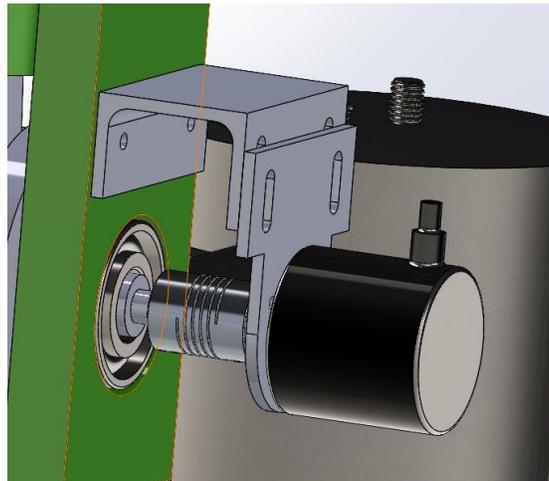
El montaje del encoder es sencilla sin embargo es diferente para cada configuración del equipo.

Monocilindro y Cuatro cilindros en V. Se usó el agujero roscado M8 que se encuentra originalmente en la polea del eje del cigüeñal, se insertó un perno el agujero, en el extremo del perno con ayuda de la fresa se realizó el planeado de un segmento de la circunferencia para con ayuda de un acople flexible acoplar el encoder con cigüeñal.

Cuatro cilindros en línea. Esta configuración originalmente contaba con un encoder que usaba una rueda de madera con una sección de su perímetro con cable de cobre expuesto, la rueda tenía contacto con una lámina metálica que conectaba con un conductor, al hacer contacto el arco del círculo con alambre expuesto con la lámina se cortocircuitaba enviando la señal al osciloscopio antiguo del equipo. Para la instalación del encoder se usó la extensión del eje del cigüeñal que ingresa en un acople flexible, el encoder se sujeta a la placa lateral del prototipo de motor, mediante una base impresa en 3D.

Figura 106

Instalación del encoder en la configuración 4 cilindros en línea



Presupuesto final del proyecto

De acuerdo a los requerimientos necesarios del proyecto y al dimensionamiento y selección de elementos realizado en los capítulos previos, el costo total del proyecto se detalla en la Tabla 39.

Tabla 39*Presupuesto final del Proyecto*

Elementos	Cantidad	Costo[\$]	Costo
			Total[\$]
Conductores	1	30	30
Terminales y conectores	1	20	20
Cable de PLC	1	40	40
Módulo analógico PLC	1	151,2	151,2
Encoder	1	45	45
Envolvente del tablero eléctrico	1	92,23	92,23
Fusibles	2	3	6
Disyuntores	2	6	12
Epóxico de protección de Galgas extensiométricas	2	5	10
Transmisores de celdas de carga	2	26	52
Luz indicadora	3	3,5	10,5
Paro de emergencia	1	2	2
Regleta de tomacorrientes	1	7	7
Mesa de soporte	1	42	42
Soporte de Encoder Impresión 3D	1	6	6
Soporte de Pantalla HMI Impresión 3D	1	6	6
Fuente de 24V	1	32	32
Regulador de voltaje DC	1	5	5
Relé de estado sólido	1	11,5	11,5
Acople flexible del encoder	1	4	4
Canaletas y soportes de cables	1	10	10
		Total	594,43

Capítulo V: Integración, pruebas y resultados

Para completar la implementación del sistema, en este capítulo se detalla el proceso de integración de las diferentes partes que conforman el mismo. Se verifica la comunicación y se calibran los instrumentos. Se define la secuencia de activación del sistema y se realizan las pruebas de funcionamiento necesarias para evaluar su desempeño en conjunto. Se analizan e interpretan los resultados obtenidos en contraste con los requerimientos del proyecto.

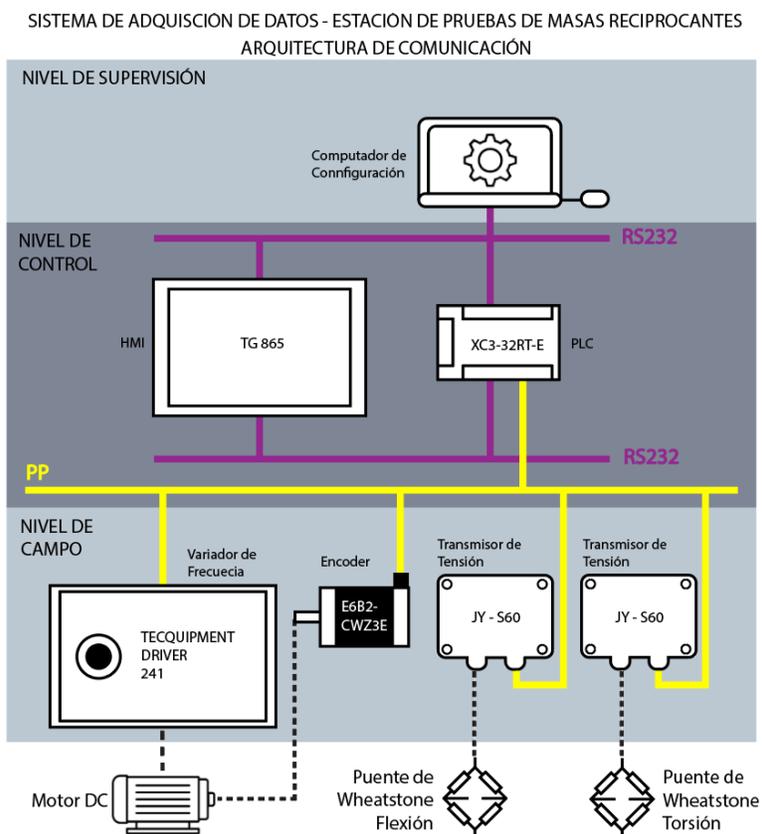
Integración del sistema

Arquitectura de la Comunicación

La arquitectura de comunicación que interrelaciona los elementos del sistema de adquisición de datos de la estación de pruebas de masas recíprocantes se resume en la figura Figura 107.

Figura 107

Arquitectura de comunicación



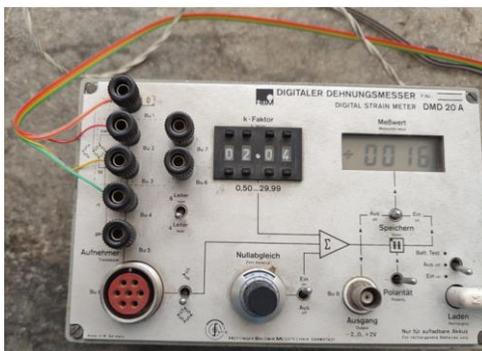
En el diagrama presentado, se establecen los principales elementos de configuración, control, medición y actuación distribuidos dentro de las categorías principales de la jerarquía de automatización:

- Nivel de Supervisión: La computadora mediante la cual se accede a la configuración de los dispositivos de control, Controlador Lógico Programable e Interfaz Humano – Máquina.
- Nivel de Control: Autómata Programable y Pantalla HMI. Se realiza el procesamiento de la secuencia de control implementada y se muestra la información tratada a partir de los datos recopilados.
- Nivel de Campo: Sensores y Actuadores. Se encuentran los sensores de deformación unitaria y de posición angular, con sus respectivos dispositivos de transmisión. También se encuentra el variador de frecuencia para el control del motor DC.

Como se especifica en las hojas técnicas de los dispositivos Xinje XC3-32RT-E y TG 856, la comunicación entre estos dos equipos, y a su vez, entre los equipos y el computador de configuración, se resuelve mediante el protocolo RS232. Mientras que, la comunicación entre el Nivel de Control y el Nivel de Campo se realiza mediante una comunicación punto a punto, debido a que se tiene señales del tipo analógico, digital y de pulsos de alta frecuencia. (Xinje, 2022)

Calibración y verificación de Celdas de Carga

Para comprobar el correcto funcionamiento se usó el equipo de laboratorio DMD 20A medidor de tensiones digital, el cual permite ingresar las constantes de las galgas y amplificar la señal de salida al aplicar carga en un extremo de la galga.

Figura 108*Medidor de tensiones***Secuencia de Activación**

En concordancia con las denominaciones de los elementos y equipos identificados en los planos eléctricos del tablero de control, se sigue la siguiente secuencia de activación para el uso y correcta operación del sistema de adquisición de datos:

1. Energizar el sistema: Establecer conexión entre el tablero de control y la red eléctrica de 110 VAC / 60 Hz mediante los enchufes que ese desprenden del tablero. En esta etapa se energiza el Controlador Lógico Programable, el convertidor AC/DC y, por ende, todos los elementos conectados a la salida de 24 V del convertidor también son energizados. Es importante verificar la posición de los interruptores de protección Q1 y Q2 para que sea posible la conexión.
2. Verificar Variador de Frecuencia: Con el Driver TecQuipment 241 previamente conectado, verificar la posición de la perilla según las recomendaciones de la guía de laboratorio para garantizar un arranque seguro del motor DC.
3. Seleccionar: Con la estación operativa y el motor encendido, el usuario puede dirigirse a la pantalla de Selección mediante la Interfaz Humano – Máquina y una vez dentro es necesario escoger la configuración del mecanismo de masas recíprocas que

corresponda con el modelo instalado en el banco de pruebas en ese momento.

4. Iniciar: Dentro de la pantalla de Proceso de la configuración deseada, es posible iniciar el monitoreo de los datos de interés y dar arranque al motor eléctrico mediante la activación del pulsador de Inicio que se localiza en la pantalla actual. El Motor DC arranca mediante el variador de frecuencia que se encuentra habilitado gracias a que el contacto K4 se cierra con al iniciar el proceso. A partir de este punto ya es posible visualizar la información recogida de la estación y esta puede ser verificada mediante la pantalla de procesos, pantalla de alarmas y la pantalla de históricos.

Análisis de Resultados

Análisis Cuantitativo

Para el análisis cuantitativo se va a tomar el modelo mono cilíndrico del banco de pruebas, en el caso desbalanceado, los datos proporcionados por el fabricante y que corresponden al modelo CAD realizado son:

Tabla 40

Datos del mecanismo de motor monocilindro

Datos	Símbolo	Valor
Masa del eslabón 2	m_2	0,79 [g]
Masa del eslabón 3	m_3	0,15 [g]
Masa del pistón	m_4	0,128 [g]
Masa del motor	M	15,25 [g]
Distancia la eslabón 3	l_a	0,03109 [m]
Distancia lb eslabón 3	l_b	0.08621 [m]
Centro del gravedad eslabón 2	rg_2	0,0004154 [m]
Longitud eslabón 2	r	0,029 [m]
Frecuencia de resonancia	w_n	845,82 [rpm] 88,57406328 [rad/seg]
Constante elástica del sistema	k	119641,8114[N/m]

De acuerdo con el análisis dinámico del motor mono cilíndrico, semejante al mecanismo biela manivela obtenemos:

$$m_{2a} = m_2 \frac{r g_2}{r} = 0.79 \frac{0.0004154}{0.029} = 0.01132 [g]$$

$$m_{3a} = m_3 \frac{l_b}{l} = 0.15 \frac{0.08621}{0.08621 + 0.03109} = 0.11024 [g]$$

$$m_{3b} = m_3 \frac{l_a}{l} = 0.15 \frac{0.03109}{0.08621 + 0.03109} = 0.03976 [g]$$

$$m_a = m_{2a} + m_{3a} = 0.01132 + 0.11024 = 0.1216 [g]$$

$$m_b = m_{3b} + m_4 = 0.03976 + 0.128 = 0.16775 [g]$$

Considerando que la velocidad angular es $\omega = 500 [rpm] = 52.3599 \left[\frac{rad}{s} \right]$

La fuerza transmitida se obtiene:

$$F_{trxd}(t) = m_a r \omega^2 \frac{\cos(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + m_b r \omega^2 \left[\frac{\cos(\omega t)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + \frac{r}{l} \frac{\cos(2\omega t)}{1 - \left(2\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]$$

$$F_{trxd}(t) = 9.6646 \frac{\cos(\omega t)}{0.7397} + 13.3375 \left[\frac{\cos(\omega t)}{0.7397} + 0.2472 \frac{\cos(2\omega t)}{-0.04123} \right]$$

Tabla 41

Datos Tiempo vs. Fuerza Transmitida Motor monocilindro desbalanceado

Tiempo[s]	Fuerza transmitida $F_{trxd}(t)$ [N]
0	-48,8742
1	24,4371
2	24,4371
3	-48,8742
4	24,4371
5	24,4371
6	-48,8742
7	24,4371
8	24,4371
9	-48,8742
10	24,4371
11	24,4371

12	-48,8742
13	24,4371
14	24,4371
15	-48,8742
16	24,4371
17	24,4371
18	-48,8742
19	24,4371
20	24,4371
21	-48,8742

Se debe encontrar la deformación causada a partir de la fuerza transmitida en los puntos donde se encuentran las galgas extensiométricas, para ello consideramos la geometría, momento de inercia y distancia de las galgas al centro de masa del motor.

Tabla 42

Propiedades geométricas y mecánicas de la barra de torsión

Datos	Símbolo	Valor
Diámetro de la barra	d	0.016 [m]
Distancia de las galgas de flexión	L_c	0,127 [m]
Módulo de Young	E	200 [GPa]

Obtenemos el esfuerzo flector a partir del valor de la fuerza transmitida:

Para $t = 1[s]$

$$\delta = \frac{32(P * L_c)}{\pi * d^3} = \frac{32(24.4371 * 0.127)}{\pi * 0.016^3} = 7717,80 [MPa]$$

Deformación unitaria en $t = 1[s]$

$$\epsilon_1 = \frac{\delta}{E} = \frac{7717.80}{200 * 10^6} = 3.8598 \times 10^{-5}$$

En un intervalo de 20 segundo se obtiene:

Tabla 43*Esfuerzo y Deformación Unitaria 500rpm Motor monocilindro desbalanceado*

Tiempo	Fuerza transmitida	Esfuerzo flector	Deformación unitaria
0	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
1	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
2	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
3	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
4	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
5	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
6	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
7	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
8	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
9	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
10	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
11	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
12	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
13	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
14	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
15	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
16	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
17	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
18	-48,87418161	-15435595,07	-7,7178E-05
19	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05
20	24,43709081	7717797,534	3,8589E-05

Para la obtención de la deformación unitaria real en la barra de torsión con el prototipo de motor mono cilíndrico, se debe accionar el motor a la velocidad angular calculada $\omega =$

$500[rpm] = 52.3599 \left[\frac{rad}{s} \right]$. Y obtener los valores, de deformación, debido a la configuración de offset y amplificación de voltaje del transmisor de la celda, no necesariamente se obtendrá el mismo valor de deformación, sin embargo se debe obtener una curva de deformación en el tiempo igual.

Como configuración del sistema de adquisición de datos, se toma un valor inicial de deformación unitaria de $\epsilon_0 = 10 \times 10^{-5}$, cuando la máquina está en reposo, a partir de este valor se obtiene la curva de deformación en un rango de $[0; 20 \times 10^{-5}]$, de esta manera en un intervalo de $t = 20[s]$, después de alcanzar la velocidad $\omega = 500[rpm]$ se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 44

Deformación Unitaria Medida 500rpm Motor monocilindro desbalanceado

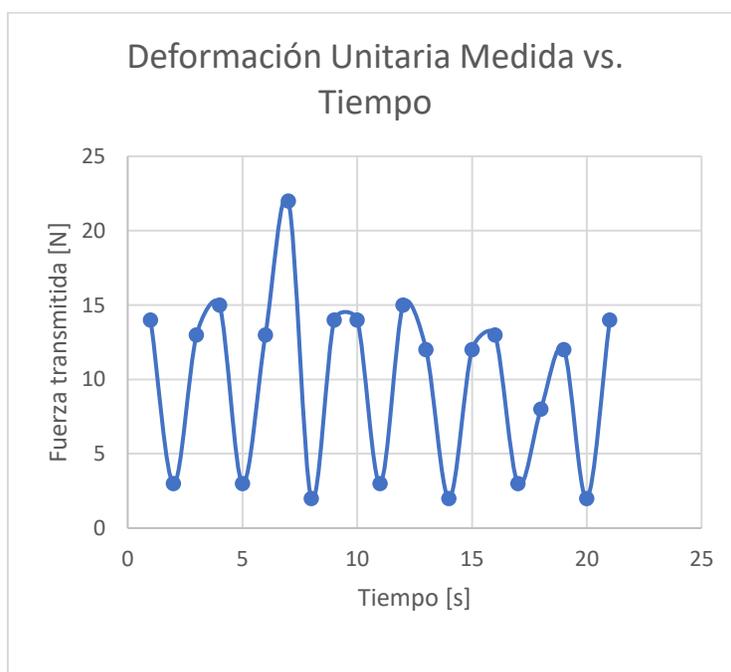
Tiempo[s]	Deformación[$\times 10^{-5}$]
1	14
2	3
3	13
4	15
5	3
6	13
7	22
8	2
9	14
10	14
11	3
12	15
13	12
14	2
15	12
16	13
17	3
18	8
19	12
20	2
21	14

Se puede identificar dos muestras insignificantes para el análisis en el tiempo $t=7$ y $t=18$, estos no serán tomados en cuenta para el análisis.

Considerando que el valor de deformación $\epsilon_0 = 10 \times 10^{-5}$ del sistema de adquisición de datos debido al formato de la gráfica del HMI, es equivalente a la deformación en el estado de reposo, es decir $\epsilon_0 = 0 \times 10^{-5}$.

Figura 109

Deformación Unitaria Medida 500rpm Motor monocilindro desbalanceado

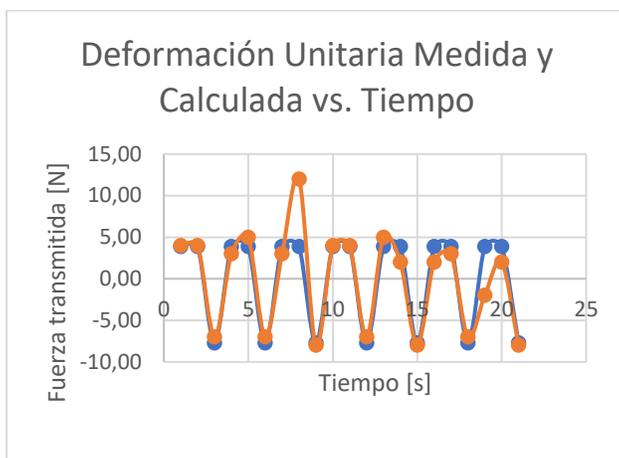


Desfasamos la gráfica restando 10×10^{-5} a los valores medidos. De igual manera en el eje de las abscisas de la gráfica se debe desplazar el tiempo, considerando que se desconoce la posición inicial al iniciar el periodo de toma de datos en el prototipo.

De esta manera se obtiene:

Figura 110

Deformación Unitaria Calculada y Medida Monocilindro 500rpm desbalanceado

**Tabla 45**

Error de Deformación Unitaria Calculada y Medida Monocilindro 500rpm desbalanceado

Tiempo	Deformación Calculada	Deformación medida	Error
1	3,86	4	3,66
2	3,86	4	3,66
3	-7,72	-7	9,30
4	3,86	3	22,26
5	3,86	5	29,57
6	-7,72	-7	9,30
7	3,86	3	22,26
8	3,86	12	210,97
9	-7,72	-8	3,66
10	3,86	4	3,66
11	3,86	4	3,66
12	-7,72	-7	9,30
13	3,86	5	29,57
14	3,86	2	48,17
15	-7,72	-8	3,66
16	3,86	2	48,17
17	3,86	3	22,26
18	-7,72	-7	9,30
19	3,86	-2	151,83
20	3,86	2	48,17
21	-7,72	-8	3,66
		% Error promedio	25,34

Análisis Cualitativo

Para el análisis cualitativo se va a tomar como referencia el funcionamiento del prototipo de motor de 4 cilindros en línea con ángulo de fase variable, en este caso se compara la forma de la señal obtenida de acuerdo a la configuración de fase del cigüeñal.

Motor de cuatro cilindros en línea

Ángulos de fase

$$\phi_1 = 0 \quad \phi_2 = 90 \quad \phi_3 = 180 \quad \phi_4 = 270$$

Se configura el prototipo de motor de cuatro cilindros soltando los prisioneros de los muñones de las bielas, y se ubica en la posición deseada considerando como ángulo cero la ubicación del muñón del primer cilindro desde la derecha, como se muestra en la Figura 111.

Figura 111

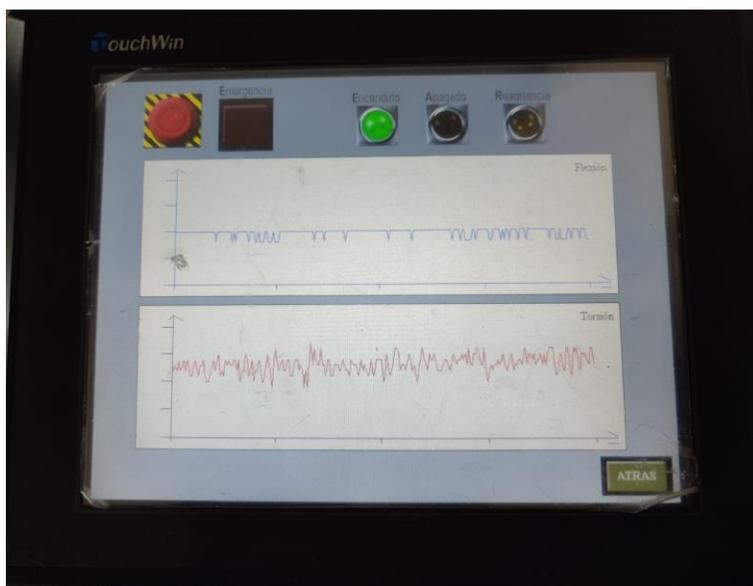
Motor 4 cilindro en línea $\phi_1=0$ $\phi_2=90$ $\phi_3=180$ $\phi_4=270$



La velocidad media es $\omega = 219 \text{ rpm} = 22.94 \text{ rad/s}$, en la pantalla correspondiente a este prototipo se muestra los valores en tiempo real de deformación por flexión, torsión, velocidad angular e indicadores de funcionamiento como se muestra en la Figura 112 .

Figura 112*Captura HMI Motor 4 cilindros*

La gráfica de las curva de deformación de torsión y flexión medidas por el sistema se muestran en la Figura 113.

Figura 113*HMI Curvas de deformación de flexión y torsión Motor 4 cilindros*

La respuesta en la forma de la curva de deformación en flexión debe ser igual a la curva de fuerzas transmitidas que se muestran en la Figura 114; de igual manera la forma de la curva

de deformación por torsión debe ser semejante a la curva de momentos transmitidos mostrada en la Figura 115.

Figura 114

Fuerza Transmitida vs tiempo Motor Cuatro cilindros

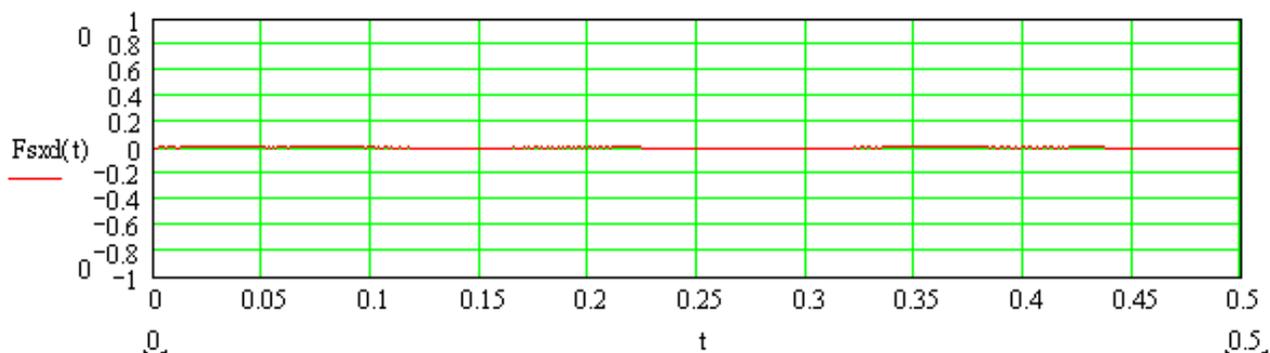
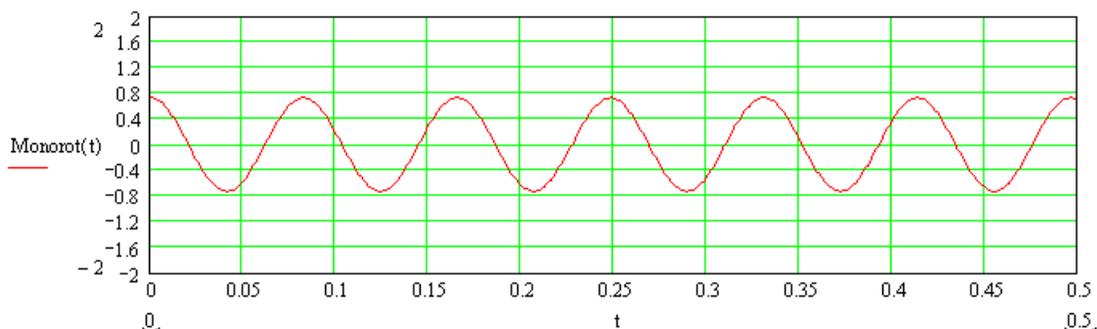


Figura 115

Momentos transmitidos vs tiempo Motor Cuatro cilindros



Análisis

En la curva de flexión que se espera es una recta, en esta configuración no se generan fuerzas transmitida en el eje de las ordenadas, en el gráfico de deformación medida se observa que el comportamiento promedio de la curva es constante, a pesar de que existen picos donde el valor de deformación es diferente de cero, esto puede deberse a vibraciones externas transmitidas al sistemas, ruido eléctrico que afecte a la señal, al deprecia estos puntos que nos representativos del comportamiento real del sistema se observa que la curva de flexión medida

por el sistema de adquisición de datos en consecuencia con la curva de fuerzas transmitidas calculada.

En la curva de deformación por torsión medida se puede observar una señal periódica con picos constantes, semejante a la curva sinusoidal de los momentos transmitidos, desafortunadamente la frecuencia de muestreo de la HMI para graficar la curva es de mínimo 1 segundo, sin embargo, se puede comprobar que la señal medida corresponde al comportamiento esperado en esta configuración.

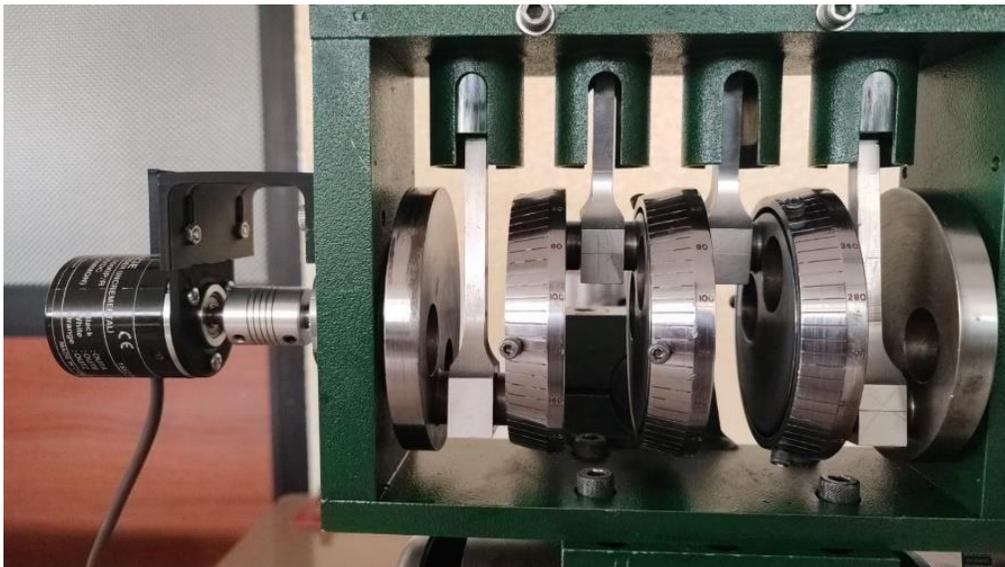
Motor de cuatro cilindros en línea

Ángulos de fase $\phi_1 = 0$ $\phi_2 = 180$ $\phi_3 = 180$ $\phi_4 = 0$

La configuración de los ángulos de fase en esta posición produce fuerzas y momentos de sacudimiento, generando curvas sinusoidales en las curvas de deformación por flexión y torsión, se ubica los ángulos del cigüeñal como se muestra en la Figura 116.

Figura 116

Motor 4 Cilindros $\phi_1=0$ $\phi_2=180$ $\phi_3=180$ $\phi_4=0$



La velocidad angular media alcanzada en esta configuración es de $\omega = 229 \text{ rpm} = 24 \text{ rad/s}$.

Figura 117

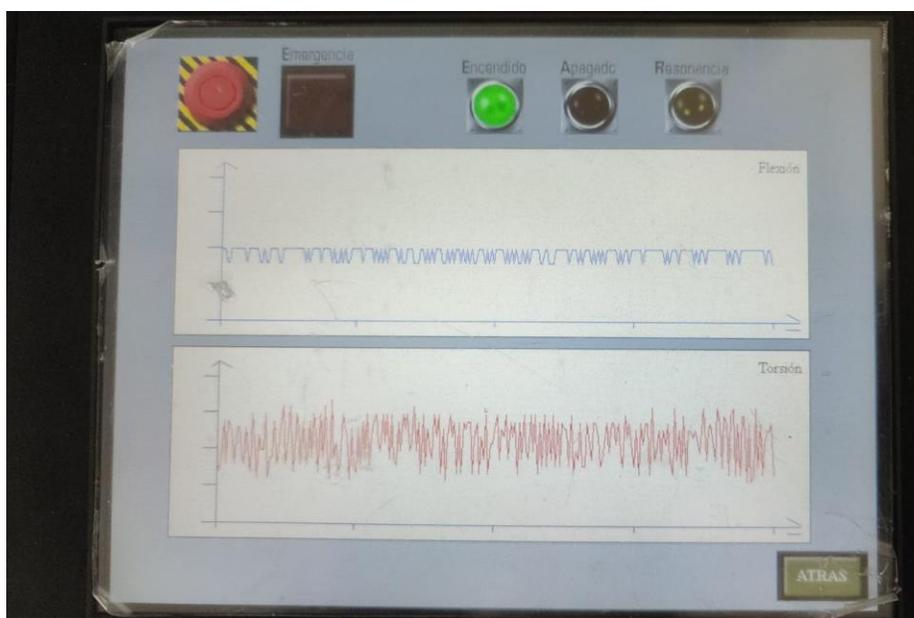
Captura HMI Motor 4 cilindros en línea



Las gráficas de deformación medidas debido a las fuerzas y momentos transmitidos, flexión y torsión correspondientemente, representan a señales periódicas con picos constantes se muestran en la Figura 118.

Figura 118

Deformación medida



Los valores de la función de fuerza y momentos transmitidos durante el tiempo para la configuración de cuatro cilindros en línea con ángulos de fase $\phi_1 = 0$ $\phi_2 = 180$ $\phi_3 = 180$ $\phi_4 = 0$ se representan en la Figura 119 y Figura 120.

Figura 119

Fuerza transmitida vs tiempo

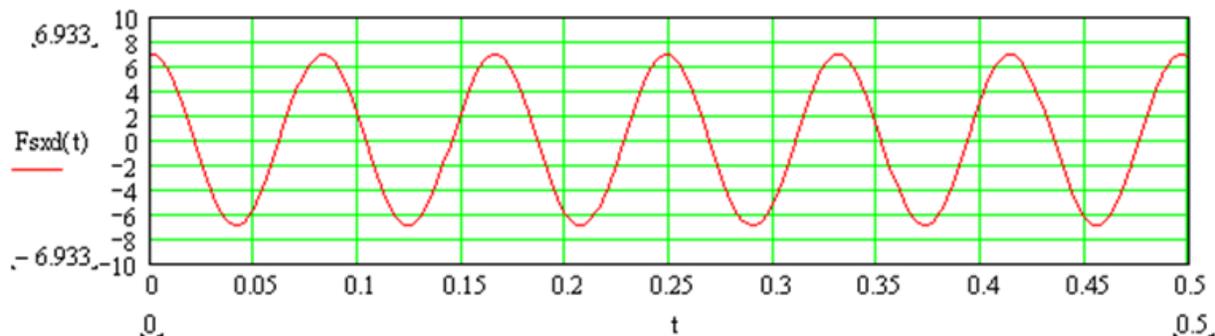
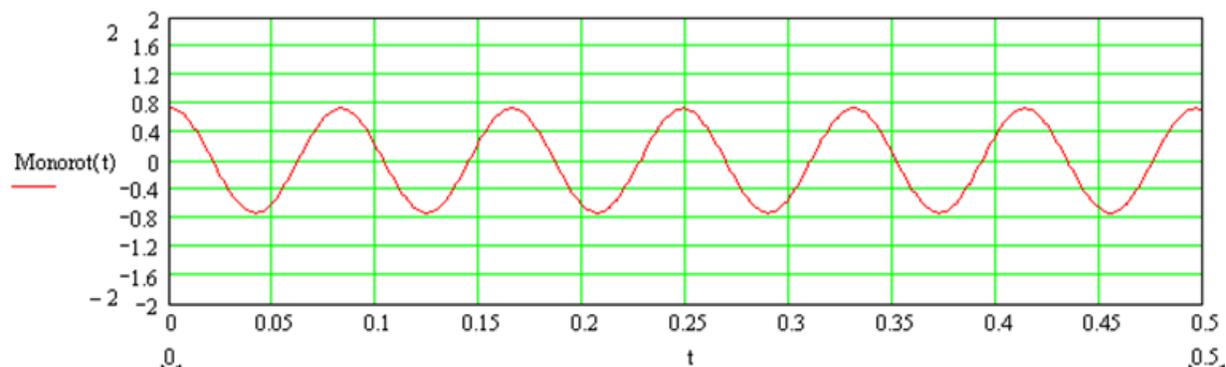


Figura 120

Momento transmitido vs tiempo



Análisis

Se puede identificar claramente que las gráficas de deformaciones medidas representan señales periódicas semejantes a las señales sinusoidales calculadas, además se identifica la diferencia de frecuencia entre la flexión y torsión, comprobando el comportamiento dinámico del prototipo de cuatro cilindros en línea de acuerdo a la base teórica, y el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos.

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se diseñó e implementó el sistema de adquisición de datos con interfaz HMI para el banco de pruebas de masas reciprocantes, que satisface los requerimientos y necesidades de docentes y estudiantes usuarios del laboratorio de mecanismos y vibraciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, campus Sangolquí. La máquina y el sistema de adquisición de datos es capaz de simular el comportamiento de un motor de combustión interna en configuraciones de un cilindro, cuatro cilindros en línea y en V, con configuraciones de cigüeñal, ángulos de fase y ángulos de V variables, accionado por un motor eléctrico con velocidad variable, mediante un módulo analógico, y un sistema de control mediante una pantalla HMI, para navegación encendido y visualización de gráficas de velocidad, deformación por flexión y torsión debidas a fuerzas y momentos de sacudimiento respectivamente, permitiendo visualizar la forma de las curvas y comprobando la base teórica que describe el comportamiento dinámico de un motor de masas reciprocantes balanceado y desbalanceado.

Haciendo uso de una interpretación muy prácticas de la normativa IEC 61131-3 de la Comisión Internacional de Electrotecnia, se desarrolla un programa versátil y funcional que cumple con los requerimientos técnicos respecto a la recopilación de los datos de interés e información importante para el estudio del banco de pruebas. Este programa cumple con los estándares de diseño de software de automatización para controladores lógicos programables, de modo que esta secuencia lógica corresponde a una solución legible, verificable, reusable y mantenible, ya que su desarrollo estructurado trajo como resultado un programa modular que, a pesar de ser eficientemente funcional, también es susceptible a mejoras y adecuaciones para afrontar futuras necesidades.

El diseño y desarrollo del interfaz humano – máquina, desde el planteamiento hasta su implementación, es realizada a partir de las consideraciones y sugerencias propuestas por la guía Gedis. El desarrollo de esta interfaz parte de la identificación de las necesidades del

sistema de adquisición de datos. Localizando las variables de supervisión y datos de interés es posible encaminar la construcción de una interfaz que se muestre amigable con el usuario y que presente de forma comprensible los datos de deformación unitaria experimentada por la barra de torsión y la velocidad angular del cigüeñal. Los sinópticos emulan y representan adecuadamente las configuraciones del mecanismo disponibles y tanto los indicadores como los comandos virtuales cumplen con sus designaciones de forma eficiente. Tanto la arquitectura y distribución, así como su navegación, se alinean con los requerimientos de ergonomía, comodidad y flexibilidad para ofrecer un conjunto de pantallas amables con el usuario y que sean capaces proveer la información requerida.

Dado el requerimiento de utilizar el controlador lógico programable Xinje XC3-32RT-E, fue necesario adquirir un módulo que permita al PLC la lectura de valores analógicos, pues el dispositivo por si solo está limitado en ese sentido. Ya con el módulo analógico XC-2AD2DA-BD, solo entonces fue posible seleccionar una instrumentación que vaya de acuerdo con las necesidades planteadas. Para la lectura de la deformación unitaria sufrida por la barra de torsión se instalan dos puentes de Wheatstone en los dos extremos de la barra, para los cuales se utiliza un módulo transmisor de peso, JY-S60, de modo que sea posible entregar a la entrada analógica del PLC una señal de voltaje entre 0 y 10V. Por otro lado, se selecciona el encoder E6B2-CWZ3E por su disponibilidad y resolución, el cual al ser conectado con las entradas de conteo rápido del PLC entrega una medición adecuada de la velocidad angular.

Recomendaciones

Se recomienda operar la estación bajo la supervisión y tutela de los docentes encargados del laboratorio, obedeciendo la secuencia de encendido. Asimismo, mediante la previa revisión del manual de usuario se recomienda familiarizarse con la navegación y el contenido de la Interfaz Humano - Máquina para garantizar una correcta interpretación del entorno y consecuentemente una correcta interpretación de la información presentada en pantalla. En concordancia con toda la documentación mencionada, también es recomendable

tener en consideración los planos eléctricos y los fundamentos teóricos detrás del sistema de adquisición de datos con el fin de facilitar el mantenimiento del equipo o su eventual modificación.

Es recomendable establecer previo contacto con la guía de laboratorio asociada al uso del banco de balanceo de masas reciprocantes para que al definir el procedimiento de la práctica se agilite la interpretación de la información, de la misma forma es necesario tener muy presentes los valores de velocidad angular que llevan al sistema a resonancia en las diferentes configuraciones y de esta forma asegurar una operación defensiva y con las precauciones pertinentes, tomando siempre en cuenta también la información visual, las señales de alerta y alarma y las recomendaciones del docente.

Para evitar la confusión de los datos recopilados en las diferentes configuraciones y ajustes de masas reciprocantes, se recomienda esperar el tiempo necesario hasta que el sistema se estabilice una vez ajustada la configuración y establecida una velocidad del cigüeñal para que el análisis de datos sea más consistente.

Trabajos Futuros

La proyección a futuro del sistema de adquisición de datos es que pueda recibir señales de otros equipos de laboratorio, además controlar de manera digital o analógica los actuadores del banco de pruebas de masas reciprocantes, en este caso el motor, el módulo analógico XC-BA-2DA-2AD, cuenta con dos salidas para control analógico, que pueden servir para controlar el reóstato del variador actual de la máquina. El PLC XC3-32RT-E cuenta con 18 entradas y 14 salidas digitales, de las cuales actualmente están en uso 3 entradas y 4 salidas, se puede usar la misma envolvente e indicadores del tablero para el control de otras máquinas de laboratorio.

Para la una mejor visualización de las curvas de deformación medidas por los puentes de galgas extensiométricas se puede cambiar el tipo de pantalla HMI con mejores características gráficas, de esta manera se puede observar la gráfica con tiempos de muestro menores.

Bibliografía

- Edibon. (Julio de 2022). *Equipo de balanceo de masas reciprocantes controlado desde computador PC*. Obtenido de <https://www.edibon.com/es/equipo-de-balanceo-de-masas-reciprocantes-controlado-desde-computador-pc/catalogo>
- Filali-Yachou, S., González-González, C., & Lecuona-Rebollo, C. (2015). *HMI/ SCADA standards in the design of data center interfaces: A network operations center case study*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- GUNT Hamburg. (09 de Septiembre de 2020). *Equipment for Engineering Education*. Obtenido de TM 180 Forces in reciprocating engines: https://gunt.de/images/datasheet/1380/TM-180-Fuerzas-en-motores-alternativos-gunt-1380-pdf_1_es-ES.pdf
- Hanly, S. (2020). *Shock & Vibration Overview*. Massachusetts: Endaq.
- Hernández, P., & Rodas, A. (12 de 2006). *Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1018/1/T-ESPE-014339.pdf>
- Hibbeler, R. C. (2010). *Ingeniería Mecánica Dinámica*. México: Pearson Educación.
- Hohner Automation. (2022). *Docs encoder Hohner*. Obtenido de S28 Hohner Automation: http://docs.encoderhohner.com/SERIE-28/S28_EN_01web.pdf
- Industriales Andes. (Octubre de 2022). *Industriales Andes*. Obtenido de TRANSMISOR PARA CELDAS DE CARGA JY-S60 0-10V 4-20MA: <https://industrialesandes.co/sensores/412-transmisor-para-celdas-de-carga-jy-s60-0-10v-4-20ma.html>
- Norton, R. L. (2020). *Design of Machinery*. New York: Mc Graw Hill Education.
- Olmedo, J., & Echeverría, J. (2018). *Máquinas y Mecanismos*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Omega Engineering inc. (Octubre de 2022). *Omega TM*. Obtenido de Transmisor para Celda de carga/galga extensiométrica: <https://cl.omega.com/pptst/TXDIN1600S.html>

Omron. (Julio de 2017). *IA Omron*. Obtenido de E6B2-C:

https://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/e6b2-c_ds_e_6_1_csm491.pdf

PLCopen. (2016). *IEC 61131-3: a standard programming resource*. PLCopen Org.

PLCopen. (2016). *Structuring Program Development with IEC 61131-3*. PLCopen Org.

Tecquipment LTD. (20222). *Balance de Reciprocidad de Masas*. Obtenido de Tecquipment:

<https://www.tecquipment.com/es/balance-of-reciprocating-masses>

Toapanta, M. (Julio de 2008). *Diseño de un Prototipo de motor reciprocante de 4 cilindros con programación electrónica*. Obtenido de Repositorio ESPE:

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3846/1/T-ESPEL-0532.pdf>

Wisco Industrial Instruments. (2011). *Wisco*. Obtenido de WT95 Weight transmitter:

<https://www.wisco.co.th/main/model/wt95>

Xinje. (Julio de 2020). *Kalatec*. Obtenido de Manual-hardware-IHM-Xinje-TG-TE:

<https://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Manual-hardware-IHM-XINJE-TG-TE.pdf>

Xinje. (2022). *Kalatec Automacao*. Obtenido de <https://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Modulo-de-extensao-CLP-XINJE-XD.pdf>

Xinje. (2022). *XC series PLC expansion module*. Obtenido de User Manual:

https://electricasbogota.com/es/downloads/dl/file/id/22/product/12763/xinje_xc_expansiones.pdf

Apéndices