


**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL**

**PROYECTO.**

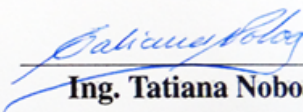
El proyecto “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, A BASE DE UNA PLATAFORMA DE SOFTWARE LIBRE PARA LA REHABILITACIÓN DE LA BALANCEADORA TIRA K300, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA LA SEGURIDAD DE LA MISMA**” fue realizado en su totalidad por Bryan Joao Puruncajas Maza y Carlos Alberto Sosa Tamayo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.



---

**Ing. Luis Echeverría**

**DIRECTOR**



---

**Ing. Tatiana Noboa**

**CODIRECTORA**

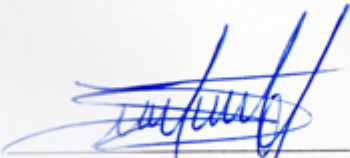
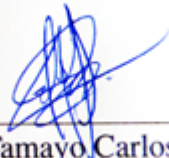
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

La proyecto de grado titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, A BASE DE UNA PLATAFORMA DE SOFTWARE LIBRE PARA LA REHABILITACIÓN DE LA BALANCEADORA TIRA K300, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA LA SEGURIDAD DE LA MISMA” ha sido desarrollado citando las fuentes correspondientes y respetando las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

En virtud de esta declaración, las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

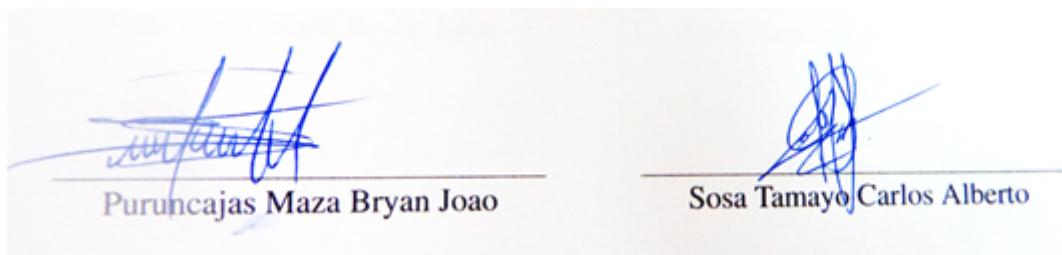
ELABORADO POR:

 Puruncajas Maza Bryan Joao	 Sosa Tamayo Carlos Alberto
---	---

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORIZACIÓN**

Nosotros, Puruncajas Maza Bryan Joao y Sosa Tamayo Carlos Alberto.

Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución el proyecto de grado titulado: **DI-SEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL, A BASE DE UNA PLATAFORMA DE SOFTWARE LIBRE PARA LA REHABILITACIÓN DE LA BALANCEADORA TIRA K300, E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA LA SEGURIDAD DE LA MISMA**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



Puruncajas Maza Bryan Joao                      Sosa Tamayo Carlos Alberto

Sangolquí, 22 de Junio 2015

# Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a mi Padre y Madre celestial, por acompañarme y siempre levantarme de mis continuos tropiezos. A mi familia por el apoyo incondicional y confianza que me han brindado siempre para cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

A mi Padre por apoyarme con todos los recursos necesarios y estar siempre a mi lado apoyándome y aconsejándome.

A mi madre por sus consejos, enseñanzas y amor, los cuales me convierten en mejor persona cada día de mi vida.

A mis hermanos por acompañarme y estar siempre presentes en cada momento.

A todo el resto de mi familia y amigos que de una u otra manera me han ayudado en este transcurso de aprendizaje. A todos en general por las ayudas y oportunidades brindadas para la realización de esta tesis.

**BRYAN JOAO PURUNCAJAS MAZA.**



Dedico este proyecto en primer lugar a Dios que es quien me ha dado la vida, recordando como dice una frase de Santa Benedicta de la Cruz, “Todo lo que hacemos es un medio para un fin, pero el amor es un fin en sí mismo, porque Dios es amor”, sabiendo que Él ha permitido que me gradúe por un propósito, y este propósito debe ser como dice Ignacio de Loyola “Ser más para servir mejor”, habiendo hecho Él todo para que lo conozca y sepa lo mucho que me ama, habiéndome permitido conocerlo por medio de mi madre del cielo, el camino más seguro para llegar a Jesucristo la Virgen María.

A mi familia que me ha demostrado su apoyo incondicional a cada momento, mediante muchos sacrificios, a mi papá que siempre ha hecho todo pensando en su familia, a mi mamá que se ha incomodado todos los días esforzándose y ayudándome en todo, a mis hermanos, que me acompañaron en cada desvelo, que con cada momento compartido han demostrado ese amor que Dios nos ha dado como familia.

A mis tíos, tías, abuelito, abuelitas, tía abuelita, primos, primas que han formado parte de esta vida que Dios nos ha dado y me han enseñado mucho son su experiencia y amor.

A mis amigos que hemos estado juntos en todo este tiempo de estudio y han sido un apoyo para lograr cumplir este objetivo.

A todos los amigos que rezaron por mi.

**CARLOS ALBERTO SOSA TAMAYO.**

# Agradecimientos

Agradecemos a los ingenieros de la universidad por los conocimientos impartidos.

Al Ing. Roberty Velasco y al Sr. Nelson Cárdenas por todas las ayudas brindadas a lo largo de la realización de la presente tesis.

Agradecemos a nuestros amigos, los cuales directa o indirectamente nos ayudaron en la finalización del presente trabajo, así como agradecemos a todos nuestros familiares por todas las oportunidades y apoyo.

**BRYAN JOAO PURUNCAJAS MAZA.**

**CARLOS ALBERTO SOSA TAMAYO.**

# Índice general

<b>Certificado</b>	<b>II</b>
<b>Autoría de Responsabilidad</b>	<b>III</b>
<b>Autorización</b>	<b>IV</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Índice General</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XIV</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XX</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del Problema. . . . .	1
1.2. Hipótesis . . . . .	1
1.3. Objetivos. . . . .	1
1.3.1. Objetivo General. . . . .	1
1.3.2. Objetivos Específicos. . . . .	2
1.4. Justificación e importancia. . . . .	2
1.5. Alcance . . . . .	3
1.6. Antecedentes. . . . .	3
1.7. Estructura del documento . . . . .	3

<b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO.</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción al balanceo . . . . .	5
2.2. Causas del desbalanceo . . . . .	5
2.3. Vibración un movimiento periódico . . . . .	6
2.4. Excitación en máquinas . . . . .	7
2.5. Desbalance. . . . .	7
2.5.1. Desbalance estático. . . . .	7
2.5.2. Desbalance por par de fuerzas . . . . .	9
2.5.3. Desbalance cuasi-estático . . . . .	9
2.5.4. Desbalanceo dinámico. . . . .	10
2.6. Ecuaciones Analíticas para el balanceo rotacional. . . . .	12
2.6.1. Balanceo en un plano. . . . .	12
2.6.2. Balanceo en un plano usando analizador de vibraciones. . . . .	13
2.6.3. Balanceo en dos planos. . . . .	14
2.6.4. Método para determinar los coeficientes de influencia . . . . .	17
2.6.5. Balanceo en dos planos usando analizador de vibraciones. . . . .	18
2.7. Selección de la masa de prueba . . . . .	20
2.8. Norma ISO 1940. . . . .	20
2.8.1. Usando la norma. . . . .	22
2.9. Máquinas de balanceo. . . . .	24
2.9.1. Balanceo en taller . . . . .	24
2.9.2. Balanceo en sitio . . . . .	24
2.9.3. Balanceo en taller vs en sitio . . . . .	24
2.9.4. Clasificación. . . . .	25
2.9.4.1. Rotores rígidos. . . . .	25
2.9.4.2. Rotores flexibles. . . . .	25
2.9.5. Generalidades TIRA K300. . . . .	25
2.9.6. Datos Técnicos. . . . .	26
<b>3. INTRODUCCIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>27</b>
3.1. Descripción . . . . .	27
3.1.1. Componentes de la máquina . . . . .	27
3.1.2. Panel de control . . . . .	28
3.2. Características . . . . .	29
3.2.1. Procedimiento para la adquisición de datos . . . . .	29
3.2.2. Selección de medida . . . . .	29
3.2.3. Selección del transductor . . . . .	30
3.2.4. Ubicación del transductor . . . . .	31

3.2.5.	Acondicionamiento de la señal . . . . .	32
3.2.6.	Muestreo . . . . .	33
3.2.6.1.	Aliasing . . . . .	34
3.2.6.2.	Supresor de Aliasing . . . . .	35
3.3.	Funcionamiento . . . . .	36
3.3.1.	Dominio del tiempo . . . . .	36
3.3.2.	Relación entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración	37
3.3.3.	Ángulo de fase. . . . .	37
<b>4.</b>	<b>SISTEMA ELÉCTRICO/ ELECTRÓNICO</b>	<b>39</b>
4.1.	Descripción del sistema eléctrico y electrónico. . . . .	39
4.2.	Elementos del Sistema eléctrico. . . . .	39
4.2.1.	Fusibles. . . . .	39
4.2.2.	Relé térmico. . . . .	40
4.2.3.	Arrancador MINISTART 5.5 B. . . . .	41
4.2.3.1.	Indicadores operacionales. . . . .	42
4.2.3.2.	Características Técnicas. . . . .	42
4.2.4.	Freno BR220-20. . . . .	43
4.2.4.1.	Características Técnicas. . . . .	43
4.2.5.	Contactador. . . . .	43
4.2.5.1.	Características Técnicas. . . . .	44
4.2.6.	Motor eléctrico . . . . .	44
4.2.6.1.	Características técnicas. . . . .	45
4.3.	Elementos del Sistema electrónico. . . . .	45
4.3.1.	Sensores. . . . .	45
4.3.1.1.	Características Técnicas. . . . .	46
4.3.2.	Encoder . . . . .	46
4.3.2.1.	Características Técnicas. . . . .	46
4.3.3.	Integrado TLC082CP . . . . .	46
4.3.4.	Integrado LTC1063. . . . .	47
4.3.5.	Integrado LM7805. . . . .	48
4.3.6.	Optoacoplador 4N26. . . . .	49
4.4.	Diseño de las Tarjetas electrónicas. . . . .	49
4.4.1.	Tarjeta electrónica de riel. . . . .	49
4.4.2.	Placa electrónica del piezosensor. . . . .	52
4.4.3.	Placa electrónica del encoder/fuente 5VDC. . . . .	54
4.4.3.1.	Placa electrónica DB-25. . . . .	55
4.4.3.2.	Placa electrónica de filtro. . . . .	57

4.5.	Descripción del Hardware libre. . . . .	60
4.5.1.	Arduino Mega ADK. . . . .	60
4.6.	Implementación del sistema electrónico de control. . . . .	61
4.6.1.	Sistema de potencia. . . . .	61
4.6.2.	Sistema de control . . . . .	61
4.7.	Esquemas eléctricos y detalle de conexiones. . . . .	63
<b>5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA</b>	<b>64</b>
5.1.	Generalidades . . . . .	64
5.2.	Análisis del riesgo . . . . .	66
5.2.1.	Reducción del riesgo . . . . .	67
5.3.	Seguridad . . . . .	69
5.4.	Diseño Solidworks . . . . .	74
5.5.	Implementación . . . . .	74
<b>6.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE</b>	<b>76</b>
6.1.	Características. . . . .	76
6.2.	Software y Hardware. . . . .	77
6.2.1.	Arduino. . . . .	77
6.2.1.1.	Entrada de datos. . . . .	78
6.2.1.2.	Encoder. . . . .	78
6.2.1.3.	Muestreo de datos. . . . .	79
6.2.1.4.	Frecuencia para filtro Butterworth. . . . .	80
6.2.1.5.	Estadística para datos de la señal. . . . .	80
6.2.1.6.	Código Arduino. . . . .	80
6.3.	Ubuntu . . . . .	81
6.4.	Gambas . . . . .	82
6.4.1.	Diagrama del flujo del programa . . . . .	83
6.5.	Datos editables . . . . .	85
6.5.1.	Datos del rotor . . . . .	85
6.5.2.	Datos de tolerancia. . . . .	86
6.5.3.	Generación de reporte. . . . .	86
6.6.	Diseño de interfaz . . . . .	86
6.7.	Diseño de salida . . . . .	87
6.7.1.	Diseñar la salida para ajustarla al usuario . . . . .	87
6.7.2.	Entregar la cantidad apropiada de salida . . . . .	87
6.7.3.	Proveer la salida en forma oportuna . . . . .	88
6.7.4.	Elección del método de salida . . . . .	88

6.8.	Diseño de entrada . . . . .	88
6.8.1.	Mantener la pantalla simple . . . . .	89
6.8.1.1.	Tres secciones de la pantalla . . . . .	89
6.8.2.	Mantener la pantalla consistente . . . . .	89
6.8.3.	Facilitar el movimiento . . . . .	90
6.8.4.	Diseñar una pantalla atractiva y agradable . . . . .	90
6.8.5.	Utilice iconos en el diseño de las pantallas . . . . .	90
6.9.	Descripción y funcionamiento de la Interfaz. . . . .	90
6.9.1.	Conexión entre arduino e interfaz desarrollada en gambas . . . . .	90
6.9.2.	Código de lectura del puerto COM del arduino . . . . .	91
6.9.3.	Código de escritura . . . . .	93
6.9.4.	Código de lectura de arreglo de datos . . . . .	94
6.9.5.	Pantalla de inicio . . . . .	96
6.9.6.	Contraseña y usuario . . . . .	96
6.9.7.	Pantalla principal . . . . .	97
6.9.7.1.	Procedimiento para realizar la comunicación con la máquina. . . . .	97
6.9.7.2.	Selección del tipo de rotor . . . . .	97
6.9.8.	Datos de rotor . . . . .	99
6.9.9.	Balanceo en un plano . . . . .	99
6.9.9.1.	Pantalla de balanceo . . . . .	100
6.9.9.2.	Pantalla de norma ISO 1940 . . . . .	100
6.9.10.	Balanceo en dos planos . . . . .	103
6.9.10.1.	Pantalla de balanceo . . . . .	104
6.9.10.2.	Pantalla de norma ISO 1940 . . . . .	104
6.9.11.	Sensores . . . . .	107
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS DE ENSAYOS DE BALANCEO</b>	<b>109</b>
7.1.	Balanceo en dos planos . . . . .	109
7.2.	Descripción física del rotor . . . . .	109
7.3.	Cálculo de masa de prueba . . . . .	110
7.4.	Ensayo de balanceo . . . . .	110
7.5.	Cálculo de coeficientes de balanceo . . . . .	118
7.6.	Cálculo del error . . . . .	119
	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>124</b>

<b>Bibliografía</b>	<b>124</b>
<b>Anexos</b>	<b>127</b>
<b>Anexo A</b>	<b>128</b>
<b>Anexo B</b>	<b>137</b>
<b>Anexo C</b>	<b>140</b>



# Índice de Tablas

2.1. Grado de calidad de balanceo según ISO 1940 . . . . .	22
4.1. Características técnicas fusibles . . . . .	40
4.2. Características integrado TI082CP . . . . .	47
4.3. Características Integrado LTC1063 . . . . .	48
4.4. Características integrado 4N26 . . . . .	49
4.5. Conexión de tarjeta de riel con el circuito de potencia . . . . .	50
4.6. Conexión entre placa del piezosensor y arduino Mega ADK. . . . .	52
4.7. Conexión placa encoder . . . . .	54
4.8. Conexión placa electrónica DB-25 y arduino Mega ADK. . . . .	55
4.9. Conexión placa filtro . . . . .	58
6.1. Funciones usadas para pines arduino . . . . .	80
6.2. Funciones usadas para comunicación serial . . . . .	80
6.3. Funciones varias . . . . .	81
6.4. Funciones usadas de la librería Timer1 . . . . .	81
6.5. Nomenclatura datos del rotor . . . . .	85
6.6. Datos de tolerancia . . . . .	86
6.7. Color interfaz fondo pantalla . . . . .	86
6.8. Colores interfaz señales . . . . .	87
6.9. Colores botones . . . . .	87
6.10. Datos comunicación . . . . .	91
6.11. Componentes en gambas . . . . .	91
7.1. Masas de corrección primera iteración . . . . .	112
7.2. Masas de corrección segunda iteración . . . . .	114
7.3. Masas de corrección tercera iteración . . . . .	116
7.4. Errores obtenidos . . . . .	122

# Índice de Figuras

2.1. Ejemplos de forma de onda en el dominio del tiempo . . . . .	6
2.2. Análisis de Armónicas (Furier) . . . . .	7
2.3. Desbalanceo estático . . . . .	8
2.4. Vibración por balanceo estático . . . . .	8
2.5. Desbalance por par de fuerzas . . . . .	9
2.6. Desbalance cuasi-estática . . . . .	10
2.7. Desbalanceo dinámico . . . . .	11
2.8. Vibración por desbalanceo dinámico . . . . .	11
2.9. Desbalanceo en un plano . . . . .	12
2.10. Diagrama máquina balanceadora en 1 plano . . . . .	13
2.11. Diagrama Vectorial . . . . .	14
2.12. Desbalanceo en 2 planos . . . . .	15
2.13. Diagrama de la máquina balanceadora en dos plano . . . . .	18
2.14. Valor permisible residual específico de desbalance . . . . .	23
3.1. Componentes de la balanceadora TIRAK300 . . . . .	27
3.2. Panel de Control . . . . .	28
3.3. Esquema de adquisición de datos . . . . .	29
3.4. Factores de selección de medida . . . . .	30
3.5. Rango de frecuencias . . . . .	30
3.6. Ubicación Sensores . . . . .	31
3.7. Identificación y corrección de funcionamientos defectuosos . . . . .	33
3.8. Muestreo FHT . . . . .	34
3.9. a) Señal continua b) Muestreo c) Señal discreta . . . . .	34
3.10. Ejemplo de Aliasing . . . . .	35
3.11. Función de transferencia ideal para un filtro pasa bajos. . . . .	36
3.12. Gráfica desplazamiento, velocidad, aceleración . . . . .	37
3.13. Relación entre desplazamiento, velocidad, aceleración . . . . .	37
3.14. Determinación de la fase . . . . .	38

4.1. Fusibles . . . . .	39
4.2. Relé térmico . . . . .	40
4.3. MINISTART 5.5 B . . . . .	41
4.4. Freno BR220-20. . . . .	43
4.5. Contactor . . . . .	44
4.6. Motor eléctrico Dahlander . . . . .	45
4.7. Sensor piezoeléctrico . . . . .	46
4.8. Pines de conexión del integrado TLC082CP . . . . .	47
4.9. Pines de conexión del integrado LTC1063 . . . . .	48
4.10. Integrado 7805 . . . . .	49
4.11. Integrado 4n26 . . . . .	49
4.12. Interfaz circuito de potencia . . . . .	51
4.13. Vista anterior tarjeta electrónica de riel . . . . .	51
4.14. Vista posterior tarjeta electrónica de riel . . . . .	52
4.15. Alimentación y conexión placa piezosensor . . . . .	52
4.16. Fotografía placa piezosensor . . . . .	53
4.17. Vista posterior y anterior de la placa electrónica del piezosensor . . . . .	53
4.18. Conexión placa encoder . . . . .	54
4.19. Fotografía placa electrónica del encoder/fuente 5 VDC. . . . .	54
4.20. Diseño placa encoder . . . . .	55
4.21. Conexión DB-25 . . . . .	56
4.22. Fotografía placa DB25 . . . . .	56
4.23. Diagrama placa electrónica Db25 inferior . . . . .	57
4.24. Diagrama placa electrónica Db25 superior . . . . .	57
4.25. Conexión placa filtro . . . . .	58
4.26. Fotografía placa filtro . . . . .	59
4.27. Arduino Mega . . . . .	60
4.28. Sistema de potencia . . . . .	61
4.29. Sistema de control . . . . .	61
4.30. Armario de sistemas eléctricos y electrónicos . . . . .	62
4.31. Sensor Piezoeléctrico ubicado . . . . .	62
4.32. Encoder de tres canales . . . . .	63
5.1. Jerarquía de reducción de riesgos . . . . .	65
5.2. Gráfico de riesgos . . . . .	66
5.3. Barrera envolvente fija . . . . .	68
5.4. Barrera distante fija . . . . .	68
5.5. Barrera corte fija . . . . .	69

5.6. Fuerza del peso sobre la riel . . . . .	69
5.7. Carga Media Voladizo . . . . .	71
5.8. Ecuaciones simples carga central . . . . .	72
5.9. Renderizado solidworks . . . . .	74
5.10. Estructura implementada . . . . .	74
5.11. Estructura implementada . . . . .	75
6.1. Diagrama general. . . . .	76
6.2. Logo open source . . . . .	77
6.3. Logo arduino . . . . .	77
6.4. Arduino Mega ADK . . . . .	78
6.5. Señal encoder de 3 canales . . . . .	79
6.6. Logo ubuntu . . . . .	81
6.7. Logo Gambas . . . . .	82
6.8. Diagrama de flujo software en gambas . . . . .	83
6.9. Lugar de medición . . . . .	85
6.10. Comparación métodos de salida . . . . .	88
6.11. ConfiguraciónPuertoSerie.module1 . . . . .	92
6.12. ConfiguraciónPuertoSerie.module2 . . . . .	92
6.13. Módulo AgregarPuertos.module . . . . .	93
6.14. Código de escritura de datos . . . . .	94
6.15. Código de lectura de arreglo de datos . . . . .	95
6.16. Pantalla de inicio . . . . .	96
6.17. Pantalla de ingreso . . . . .	96
6.18. Pantalla principal . . . . .	97
6.19. Pantalla de selección del rotor . . . . .	98
6.20. Rotor elegido . . . . .	98
6.21. Datos rotor . . . . .	99
6.22. Resultado balanceo en un plano . . . . .	100
6.23. Pantalla norma ISO 1940, un plano . . . . .	101
6.24. Ventana con gráfica norma ISO 1940 . . . . .	101
6.25. Verificación norma, un plano . . . . .	102
6.26. Ventana reporte un plano . . . . .	103
6.27. Resultado balanceo en dos planos . . . . .	104
6.28. Norma ISO 1940 Balanceo en dos planos . . . . .	105
6.29. Ventana con gráfica norma ISO 1940 . . . . .	105
6.30. Verificación norma, dos planos . . . . .	106
6.31. Ventana reporte dos plano . . . . .	107

6.32. Pantalla sensores . . . . .	108
7.1. Rotor Solidworks . . . . .	110
7.2. Rotor implementado . . . . .	111
7.3. Datos Rotor . . . . .	111
7.4. Masa de prueba de 5 gramos . . . . .	112
7.5. Datos Rotor Balanceo1 . . . . .	112
7.6. Datos norma balanceo 1 . . . . .	113
7.7. Datos balanceo 2 . . . . .	114
7.8. Datos norma balanceo 2 . . . . .	115
7.9. Datos balanceo 3 . . . . .	115
7.10. Datos norma balanceo 3 . . . . .	116
7.11. Amplitud de vibración para cada iteración de balanceo . . . . .	117
7.12. Lectura sensor A . . . . .	117
7.13. Lectura Sensor B . . . . .	118
7.14. Datos masa 5g Plano 1 . . . . .	119
7.15. Datos masa 5g Plano 2 . . . . .	120
7.16. Datos masa 10g Plano 1 . . . . .	120
7.17. Datos masa 10g Plano 2 . . . . .	121
7.18. Datos masa 15g Plano 1 . . . . .	121
7.19. Datos masa 15g Plano 2 . . . . .	122

# Resumen

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de control para la puesta en marcha de la balanceadora TIRA K300, perteneciente al laboratorio de mecanismos y servomotores del departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica “DECEN”, para lo cual se diseñaron placas electrónicas, las cuales acondicionan las señales de vibración de dos piezosensores eléctricos, como también para un encoder de tres canales. Para lo cual se usó software y hardware libre, se usó el hardware Arduino para la adquisición de datos de las tarjetas electrónicas, y el software Gambas 3 para crear la aplicación gráfica del proceso de balanceo, para lo cual se usó el método vectorial para identificar el lugar del desbalance en uno o dos planos.

## **PALABRAS CLAVE:**

- **VIBRACIONES**
- **ROTORES**
- **BALANCEADORA**
- **SOFTWARE LIBRE**
- **GAMBAS**

# Abstract

The project involves the design and implementation of a control system for the start-up of the balancer TIRA K300, belonging to the laboratory of servo mechanisms and Sciences Department of Energy and Mechanical "DECCEM", to which electronic boards were designed, these determine the vibration signals of two electric piezo sensors, as for a three-channel encoder. For this we use free software and hardware, the hardware Arduino was used for data acquisition circuit boards, and the Gambas 3 software to create the graphics application of balancing process, for which the vector method was used to identify the place of unbalance in one or two planes.

## **KEY WORDS:**

- **VIBRATION**
- **ROTORS**
- **BALANCING MACHINE**
- **FREE SOFTWARE**
- **GAMBAS**

# Capítulo 1

## GENERALIDADES

### 1.1. Definición del Problema.

El Laboratorio de mecanismos cuenta con una máquina balanceadora de rotores, la cual fue adquirida aproximadamente en el año 1995, la máquina es controlada por medio de una computadora, la cual presenta daños en su tarjeta de adquisición de datos.

Por estas razones se planteó la creación de un nuevo sistema de control usando tecnología libre, de esta forma el laboratorio de mecanismos ganaría una nueva herramienta para la enseñanza de vibraciones.

### 1.2. Hipótesis

Es posible determinar el lugar de desbalance en rotores usando el sistema mecánico de la balanceadora TIRA K300, obteniendo la señal de vibración, su correspondiente magnitud y fase mediante los sensores piezoeléctricos, acondicionando la señal y enviándola por medio de un dispositivo Arduino para adquisición de datos hacia el módulo de software desarrollado en Gambas 3 para su procesamiento mediante cálculos y de esta forma obtener el resultado de la magnitud y ubicación del desbalance.

### 1.3. Objetivos.

#### 1.3.1. Objetivo General.

Diseñar e implementar un sistema de control electrónico y software a base de código abierto, como también una cubierta de protección móvil de seguridad, para la puesta en operación de la balanceadora TIRA K300



### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Analizar el funcionamiento de los sistemas eléctrico y electrónico de la Balanceadora TIRA K300 para realizar un nuevo control del sistema.
- Revisar el sistema mecánico de la balanceadora, comprobar su correcto funcionamiento y darle mantenimiento para su puesta en marcha.
- Creación de una interfaz gráfica para el fácil uso de la máquina.
- Desarrollo del manual de usuario para el software creado.
- Efectuar pruebas de operación de balanceo

### **1.4. Justificación e importancia.**

La máquina balanceadora TIRA K300, de origen alemán, realiza un balanceo dinámico a cualquier tipo de rotores, los cuales deben estar en el rango de 3-300Kg, y con un diámetro máximo de 1000 mm. Su aplicación industrial es muy importante debido al análisis y diagnóstico que nos permite realizar en las maquinas giratorias, de tal manera que nos permite determinar efectos de desgaste como:

- Vibraciones periódicas del equipo.
- Desbalance en un plano
- Desbalance en dos planos

Para el uso prolongado de este tipo de maquinaria, es necesario que el usuario tenga un conocimiento de operación del mismo, de su control eléctrico, de la función de los dispositivos que lo compone, y la interfaz con el usuario. Para lo cual se realizará manual de usuario.

En vista de lo planteado, es importante lograr la rehabilitación de la Balanceadora TIRA K300, con lo que se obtendrá una herramienta de aplicación que permita a los docentes la demostración de las teorías de vibración, y a los estudiantes, realizar pruebas que afiancen sus conocimientos y que les facilite su desempeño en la realización de proyectos a futuro.

El diseño y la construcción del nuevo sistema de control demuestra la utilización de la plataforma de código abierto y la utilización de componentes de fácil adquisición en el mercado nacional, y se constituye como una gran alternativa para el diseño de equipos.

## 1.5. Alcance

Este proyecto se enfoca en el diseño y construcción del sistema electrónico y elementos mecánicos para la seguridad de la misma, por lo que se usará libros y páginas especializadas, basándonos en normas para el diseño electrónico y también para el diseño del HMI para el control de la misma, se probará la máquina y se usará lo que este en buen estado para el nuevo control, se creará un diseño robusto, simple para el control de la máquina, se buscará que la interfaz sea lo más amigable para que sea didáctica para el aprendizaje de los estudiantes.

## 1.6. Antecedentes.

El interés por la rehabilitación y repotenciación de la máquina balanceadora TIRA K300 surgió debido al tiempo que no se ha usado, el cual es de aproximadamente 15 años.

La ESPE realizó una inversión por aproximadamente cien mil dólares por esta máquina por lo que al no usarla se pierde completamente la inversión

Mediante el cambio de la matriz productiva, que el gobierno promueve, se enfoca en la creación de conocimiento, de tal manera que mediante este proyecto de tesis se obtendrá conocimiento en la creación de software para el control y la interfaz de la máquina.

Toda máquina en operación tiene un determinado comportamiento vibratorio y el deterioro de los elementos mecánicos está acompañado por variaciones de este comportamiento vibratorio. El balanceo exacto es esencial para la operación, mantenimiento y reparación de un equipo rotativo. El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. El desbalance se debe a que el centro de gravedad de un cuerpo giratorio no coincide generalmente con su centro de rotación. Las causas más comunes son:

- En la práctica es muy difícil conseguir que la masa esté uniformemente distribuida alrededor del centro geométrico.
- El árbol sobre el cual gira el cuerpo se deforma flexionándose por efecto de la carga, desplazando al centro de gravedad fuera del eje verdadero, el cual pasa por el eje geométrico o línea central de los cojinetes.

## 1.7. Estructura del documento

El documento consta de 8 capítulos

- El primer capítulo se describe las generalidades y marco legal del proyecto, se define los objetivos y el alcance planteados para el mismo.
- El segundo capítulo se explica el funcionamiento de la máquina TiraK300, en base al marco teórico explicando como se obtiene el desbalance, explicando la norma que se aplica a la máquina
- En el tercer capítulo se explica las características generales de la máquina, y se da conceptos básicos para el balanceo
- En el cuarto capítulo se describe el sistema eléctrico y electrónico, que se usan para el funcionamiento de la máquina
- En el quinto capítulo se detalla la implementación del dispositivo de seguridad en la máquina
- En el sexto capítulo se detalla la interfaz del programa
- En el séptimo capítulo se detalla las pruebas realizadas en la máquina.
- En el octavo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el total del trabajo conjuntamente con la bibliografía.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTO TEÓRICO.

### 2.1. Introducción al balanceo

El desbalance ocurre cuando existe una distribución no uniforme de la masa de un rotor alrededor de su eje axial, en el cual este gira, este desbalance produce vibraciones, sin embargo la vibración también depende de características propias del sistema, tales como: masa, rigidez y amortiguación.

La masa está directamente relacionada al peso. La rigidez depende de la elasticidad, característica del material, y el amortiguamiento es una característica propia del sistema que mide la capacidad para disipar energía en forma de calor.

Existen 2 tipos de desbalance: Estático y Dinámico. Cuando el centro de masa del rotor está desviado de su eje de rotación y el eje principal de inercia se mantiene paralelo al eje de rotación se produce un desbalance estático. Cuando el eje principal de inercia está desviado angularmente con respecto al eje de rotación y el centro de masa permanece sobre el eje de rotación.

### 2.2. Causas del desbalanceo

Las razones mas comunes por las que puede existir desbalance son:

- Asimetría del diseño — Algunos rotores se diseñan de manera no circular , no concéntricos con el eje de rotación, tales como árboles de levas o también cigüeñales.
- Tolerancia de fabricación y ensamblaje — Elementos mecánicos que pudieron estar bien diseñados simétrica y concéntricamente, con las tolerancias de maquinado y montaje, pierden ligeramente la simetría y concetricidad, tales como engranajes, poleas, ruedas de álabes.
- Material no homogéneo — Los materiales no son perfectamente homogéneos, no presentan una densidad uniforme en todo su volumen.

- Distorsión en servicio — Se puede producir por varias causas, las mas comunes son liberación de esfuerzos y distorsión térmica. La liberación de esfuerzos se da en rotores con partes soldadas y partes que hayan sido conformadas por troquelado, prensado, etc. La distorsión térmica se da debido al calentamiento no uniforme y debido a esto los rotores no se dilatan uniformemente, causando distorsión, se da mayormente en máquinas que operan a altas temperaturas.

- Corrosión y desgaste — La corrosión y el desgaste no se dan de una manera uniforme en el rotor, por lo que produce un desbalance en el mismo.

### 2.3. Vibración un movimiento periódico

En la mayoría de máquinas rotativas, el periodo de vibración está dado por la velocidad de rotación, pues el periodo es una revolución del eje, aun cuando la señal no sea filtrada. A menudo la vibración consta de varias frecuencias, dando una señal mas compleja como se puede ver en la Figura 2.1. La combinación de las fases de los dos componentes armónicos determinan la forma de la señal medida por un transductor.

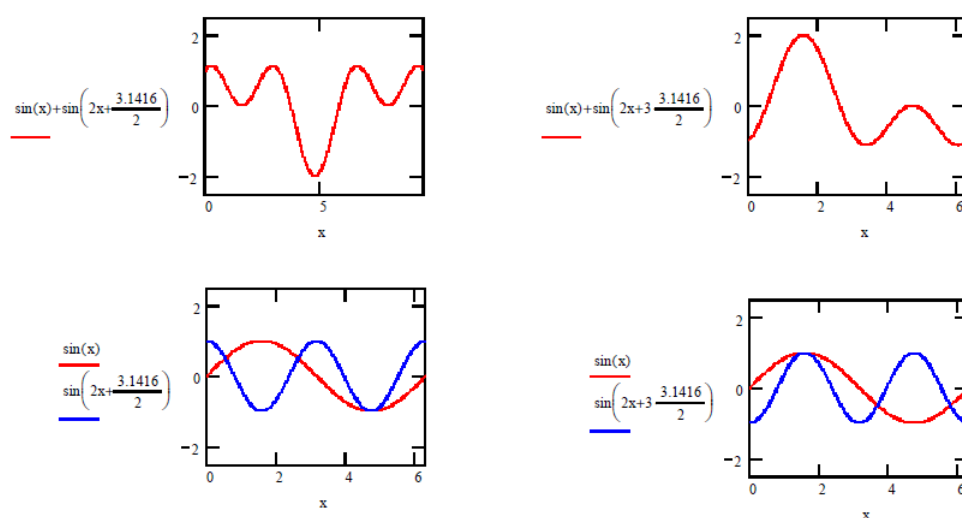


Figura 2.1: Ejemplos de forma de onda en el dominio del tiempo  
Fuente:[Ronald L. Eshleman, 2002]

La curva generada, en el gráfico tiempo vs señal del transductor proporciona información de la magnitud, frecuencia y fase de la vibración. Sin embargo en este gráfico se cuantifican solo la amplitud total y el periodo fundamental. Para realizar un análisis mas exhaustivo obteniendo las frecuencias y relaciones de fase, se hace un análisis en frecuencia. Este análisis proporciona la magnitud de vibración en cada frecuencia que compone a la señal y de esta forma se puede determinar el origen de la vibración.

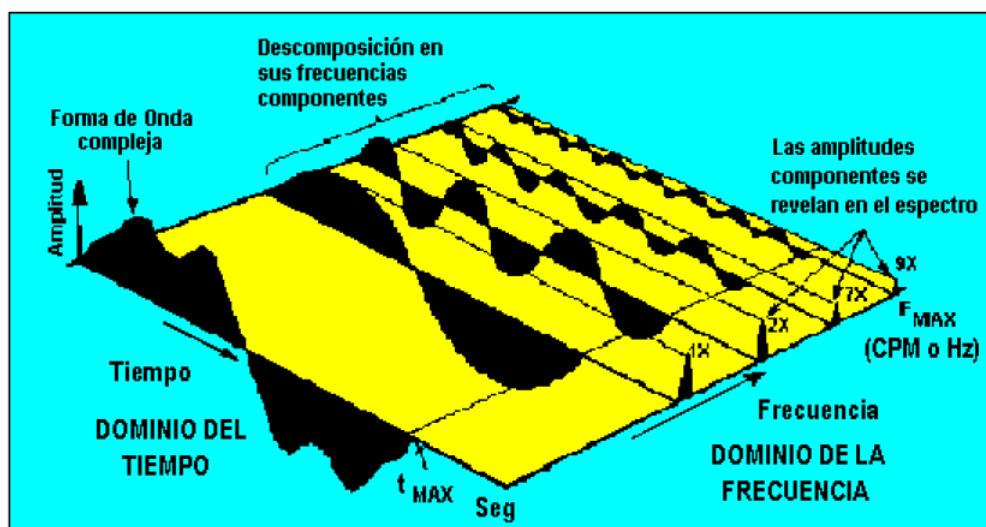


Figura 2.2: Análisis de Armónicas (Furier)

Fuente:[Ronald L. Eshleman, 2002]

## 2.4. Excitación en máquinas

Excitaciones se denominan a las fuerzas internas o externas originadas por la vibración, que normalmente no pueden ser medidos directamente en su origen sino que deben ser inferidos o calculados, existen relaciones de equivalencia entre las frecuencias de vibración.

La magnitud obtenida de la vibración no se la puede usar directamente pues esta depende de varios factores, como por ejemplo diseño mecánico de la máquina, defectos tales como desalineamiento, cojinetes defectuosos, mala instalación de la máquina.

Para el balanceo se usan masas de prueba, estas masas de prueba se traducen en fuerza aplicada al rotor y la vibración resultante es calculada mediante diagramas vectoriales teniendo como dato la vibración original.

## 2.5. Desbalance.

Cada tipo de desbalance se define por el tipo de relación que existe entre el eje principal de inercia y el eje de rotación del rotor.

Dependiendo del tipo de desbalance se deberá balancear en uno o dos planos.

### 2.5.1. Desbalance estático.

Se considera un eje rígido, uniforme y de masa despreciable, que se encuentra apoyado en dos cojinetes iguales, y posee un disco montado firmemente en el centro,

El balanceo estático se produce cuando el centro de masa del disco está desviado una distancia “e” (excentricidad) desde el eje de rotación

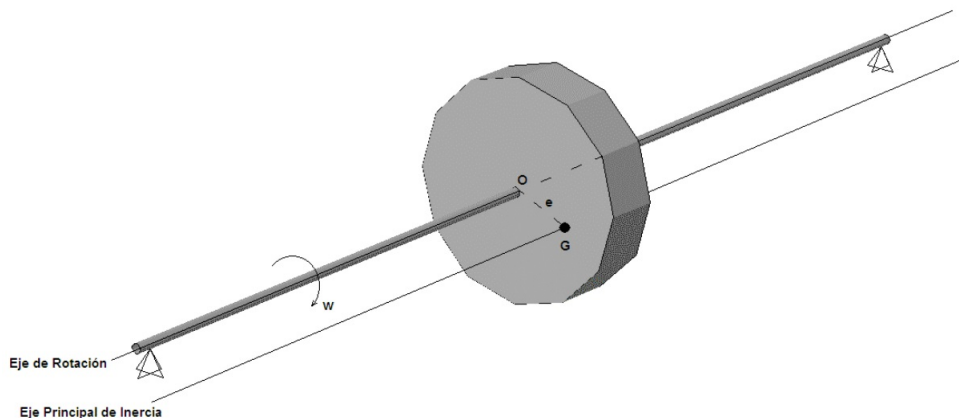


Figura 2.3: Desbalanceo estático  
Fuente:[David Bukowitz, ]

Bajo estas características, se produce una fuerza centrífuga por la masa rotativa que gira con el eje, por lo que las fuerzas aplicadas a los cojinetes también girarán para mantener el equilibrio dinámico, produciendo una vibración como muestra el gráfico siguiente.

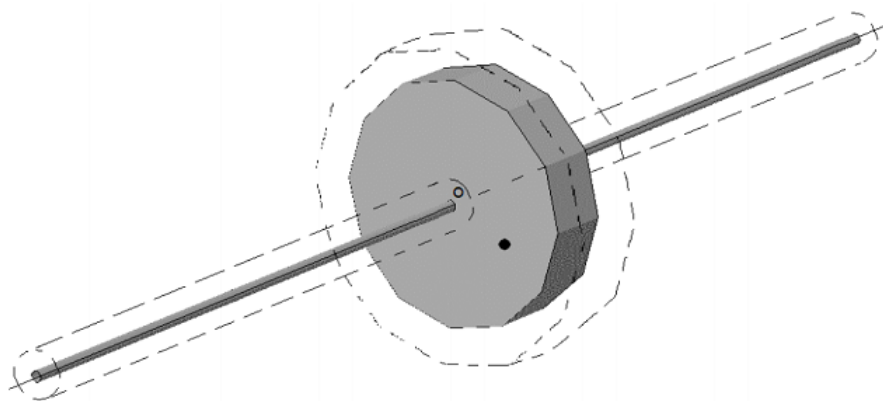


Figura 2.4: Vibración por balanceo estático  
Fuente:[David Bukowitz, ]

Esta fuerza ejercida sobre los cojinetes, es transmitida a los soportes y a toda la estructura de la máquina, generando vibración en toda la máquina. Esta vibración se la conoce como vibración sincrónica ya que está sincronizada con la velocidad de rotación del eje

Se detecta en la práctica cuando las amplitudes y las fases son iguales

Se lo puede corregir en uno o dos planos

### 2.5.2. Desbalance por par de fuerzas

Esta condición existe cuando el eje principal de inercia cruza la línea del eje de rotación en el centro de gravedad.

Se lo detecta en la práctica cuando las amplitudes sean iguales pero sus fases difieran 180 grados.

Se debe corregir en dos planos necesariamente.

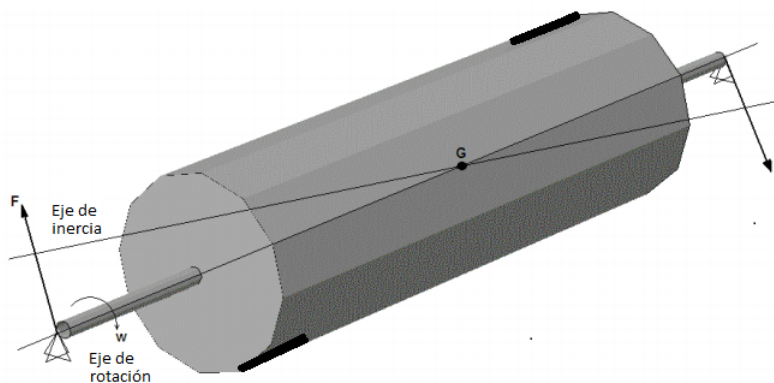


Figura 2.5: Desbalance por par de fuerzas

Fuente:[David Bukowitz, ]

### 2.5.3. Desbalance cuasi-estático

Esta condición existe cuando el eje principal de inercia cruza la línea del eje de rotación pero no en el centro de gravedad del rotor.

Se lo detecta en la práctica si la fases varían aproximadamente 180 grados, pero la amplitud en los apoyos será mayor en uno de los extremos del rotor.

Se debe corregir en dos planos necesariamente.



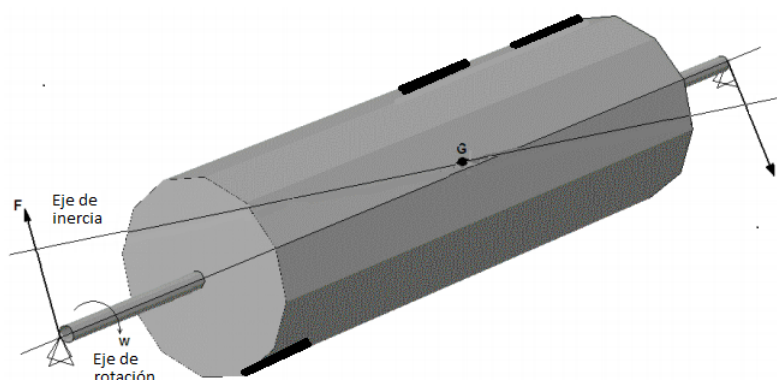


Figura 2.6: Desbalance cuasi-estática  
Fuente:[David Bukowitz, ]

#### 2.5.4. Desbalanceo dinámico.

Los rotores tienen normalmente una forma más compleja que la de un disco, pues su masa está distribuida en una buena parte considerable de su longitud, debido a lo que su eje principal de inercia podría estar desviado del eje de rotación.

Un rotor puede estar balanceado estáticamente, cuando su masa coincide con el eje de rotación, pero su eje principal de inercia está desviado angularmente con respecto al eje de rotación.

Se considera nuevamente que el eje es rígido y uniforme, y los cojinetes son iguales y razonablemente flexibles, también consideramos que el centro de masa está ubicado en el centro entre cojinetes.

Al hacer girar el rotor, este busca hacerlo alrededor de su eje principal de inercia, pero los cojinetes se lo impiden, haciéndolo girar sobre el eje de rotación o línea de centro de cojinetes. Por lo cual se crea un par que gira con el rotor y ejerce fuerzas en los cojinetes, que también giran para mantener el equilibrio dinámico.

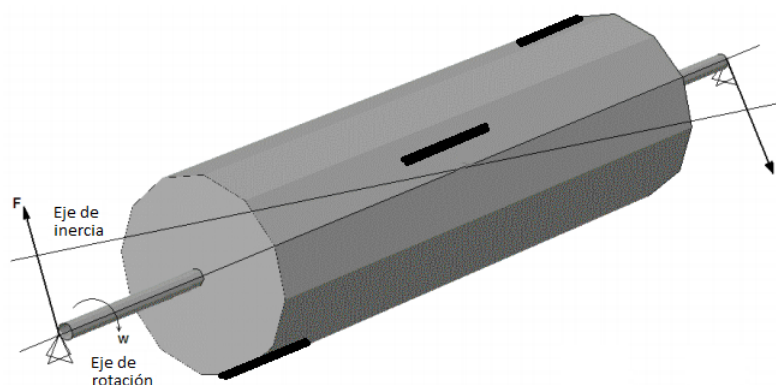


Figura 2.7: Desbalanceo dinámico  
Fuente:[David Bukowitz, ]

Estas fuerzas producidas, son de igual magnitud y dirección, solo difieren en el sentido, y debido a su separación producen un momento. El cual por la elasticidad de los cojinetes, permite que el eje axial del rotor se mueva sobre superficies cónicas alrededor del eje de rotación.

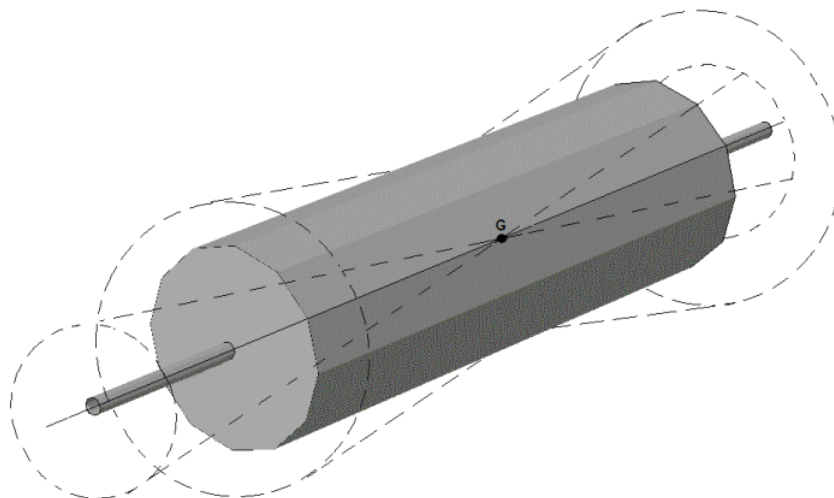


Figura 2.8: Vibración por desbalanceo dinámico  
Fuente:[David Bukowitz, ]

Este es el tipo más común de desbalanceo.

Se lo detecta en la práctica al tener amplitudes diferentes y fases no iguales ni opuestas.

Se debe corregir en dos planos necesariamente.

## 2.6. Ecuaciones Analíticas para el balanceo rotacional.

### 2.6.1. Balanceo en un plano.

Hipótesis significativas para balanceo en un plano

- El rotor es rígido (La flexión no es significativa).
- Las amplitudes de los cojinete son similares y los ángulos de fase de los cojinetes son similares (No existe desbalance de cupla)

Las suposiciones que se hacen son:

- La amplitud originada por la vibración en los apoyos es proporcional a la masa del desbalance (se asume una relación lineal)
- El desfase entre la señal de vibración y la señal señal de referencia es constante e independiente de la amplitud de la vibración.
- La vibración que se obtuvo a la frecuencia a la cual gira el rotor es únicamente una onda senoidal producto del desbalance y no intervienen otras perturbaciones.

Puede existir una masa desbalanceada en elementos mecánicos como discos, en los cuales no coinciden su centro de masa con el centro geométrico. Este desbalanceo se lo puede identificar, colocando el rotor sobre dos apoyos rígidos, y colocando una marca en la parte inferior, si al girar el rotor la marca se mantiene en la parte de abajo, se encuentra desbalanceado.

La magnitud y localización del desbalanceo puede ser determinada, haciendo girar al rotor a una velocidad constante y midiendo las reacciones en los cojinetes.

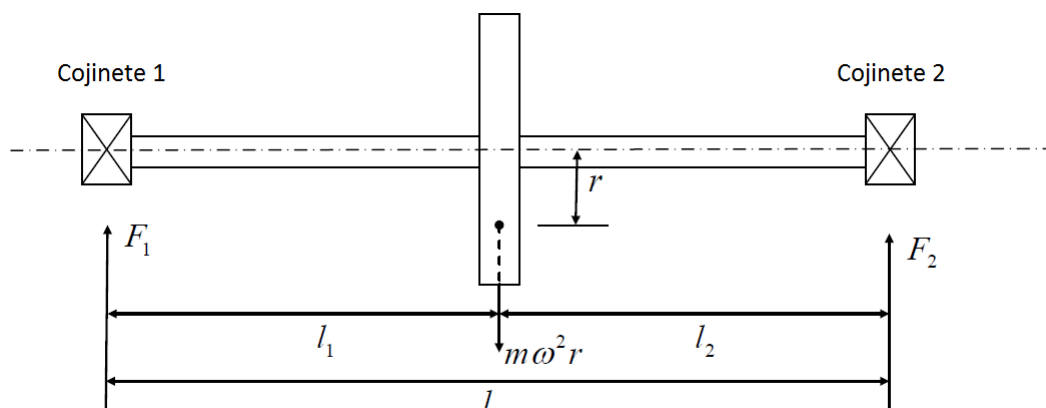


Figura 2.9: Desbalanceo en un plano  
Fuente:[Chigbogu C. Ozoegwu, 2012]

Realizando sumatoria de momentos en el cojinete 2 se tiene:

$$F_1 l = m \omega^2 r l_2 \quad (2.1)$$

$$mr = \frac{F_1 l}{\omega^2 l_2} \quad (2.2)$$

Al ser la fuerza, la velocidad y las distancias conocidas se puede calcular la ec. 2.2. El desbalance se corrige al agregar una masa igual al desbalance original en sentido opuesto o removiendo material en la localización del desbalance

### 2.6.2. Balanceo en un plano usando analizador de vibraciones.

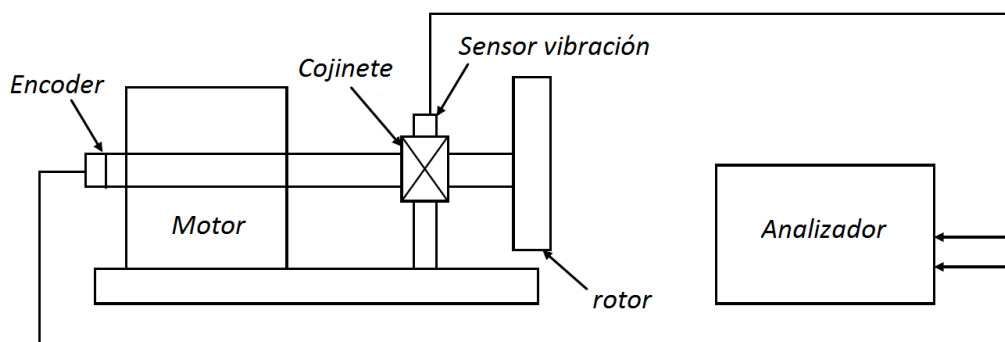


Figura 2.10: Diagrama máquina balanceadora en 1 plano

Como primer paso se necesita tener una referencia en el rotor, lo que se hace en la máquina mediante un encoder de 3 canales, 2 para detectar el giro en ambas direcciones y uno que se usa como referencia.

Luego se necesita un sensor que detecta la magnitud de la vibración, el cual está colocado en el cojinete, en una dirección horizontal con respecto al eje.

Se debe tener en cuenta que la frecuencia a la cual se debe analizar, es la frecuencia correspondiente a la velocidad angular a la que estemos haciendo la prueba

La máquina funciona a una velocidad angular  $\omega$  y la vibración ocasiona un desplazamiento máximo  $A_u$ , que es detectado por el sensor.

Por medio del encoder se obtiene el ángulo  $\theta$  del desplazamiento máximo.

Se detiene el rotor y se agrega una masa  $W$  y se repite el procedimiento anterior, obteniendo el nuevo ángulo  $\varphi$  y la nueva amplitud de la vibración  $A_{u+W}$

Se construye un diagrama vectorial como se indica en la figura siguiente

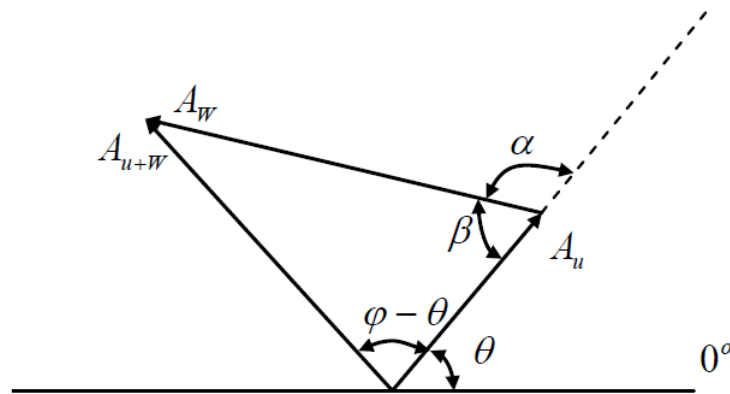


Figura 2.11: Diagrama Vectorial  
Fuente:[Chigbogu C. Ozoegwu, 2012]

$$A_w = \left( A_{u+w}^2 + A_u^2 - 2A_{u+w}A_u \cos(\varphi - \theta) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{A_{u+w}^2 - A_u^2 - A_w^2}{2A_u A_w} \right) \quad (2.4)$$

Se asume que a una distancia radial constante, la amplitud de la vibración es proporcional a la magnitud del desbalance producido. La magnitud del desbalance original se define por la ecuación 2.5

$$W_u = \left( \frac{A_u}{A_w} \right) W \quad (2.5)$$

Para un balanceo estático completo, una fuerza  $F_B$  de la misma magnitud que  $W_u$  se debe poner en la misma distancia radial que  $W$  y en un ángulo  $180 - \alpha$ .

Balancear en un plano ha probado ser efectivo para rotores de disco rígido delgado, pero no para rotores con un cuerpo rígido de gran longitud

### 2.6.3. Balanceo en dos planos.

Hipótesis significativa para el balanceo en dos planos

- El rotor es rígido (La flexión no es significativa).
- La elasticidad de los soportes son adecuados para obtener una medición clara de desbalance
- Las fuerzas radiales que se ejercen por el rotor son soportadas exclusivamente por 2 apoyos

- La amplitud que se da en cada plano es proporcional al desbalance

Se debe llevar a la práctica el método de balanceo en dos planos cuando existe un efecto cruzado moderado.

Si el efecto cruzado es casi nulo, lo recomendable es balancear por separado cada uno de los planos, ya que este efecto indica que los planos son relativamente independientes.

Si el efecto cruzado es muy grande se balancea el primer plano ubicando masas en el segundo y se balancea el segundo plano ubicando masas en el primero.

Para obtener el efecto cruzado se tiene los coeficientes adimensionales  $\alpha$  y  $\beta$  como:

$$\alpha = \frac{a_{21}}{a_{11}}; \beta = \frac{a_{12}}{a_{22}}$$

Se considera un efecto cruzado “moderado” cuando ambos coeficientes cuando  $\alpha$  y  $\beta$  están en el rango de 0.5 y 1.5

El balanceo en dos planos se usa para rotores con cuerpo rígido largo, también se la llama balanceo dinámico, ya que el resultado es la cancelación de fuerzas desbalanceadas y momentos.

La aplicación práctica del balanceo en dos planos, es cuando sabiendo que existen masas excéntricas y están posicionadas en diferentes planos, y cada masa  $m_i$  existe a una distancia axial con referencia a un plano  $l_i$ , radial  $r_i$  y angular  $\theta_i$  relativa a la referencia, se elige el plano (1) y (2) como se indica en la figura siguiente

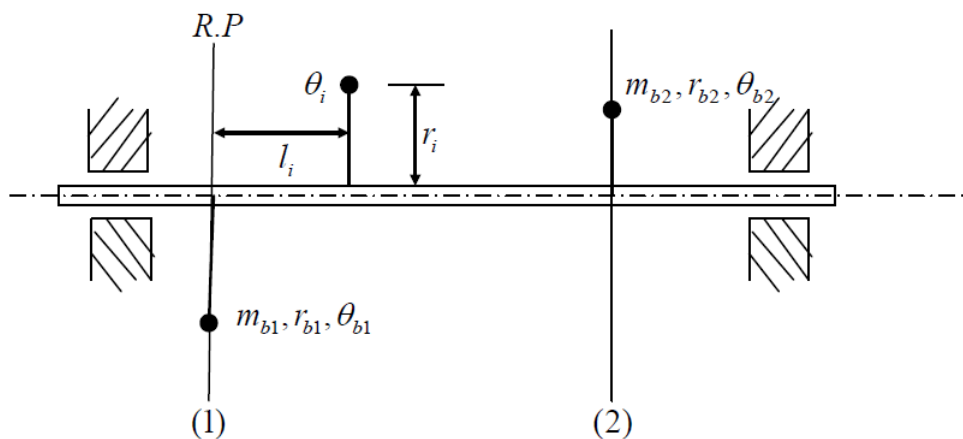


Figura 2.12: Desbalanceo en 2 planos  
Fuente:[Chigbogu C. Ozoegwu, 2012]

El rotor será dinámicamente balanceado al colocar dos masas  $m_{b1}$  y  $m_{b2}$ , a una distancia radial  $r_{b1}$  y  $r_{b2}$  a un ángulo  $\theta_{b1}$  y  $\theta_{b2}$  en los planos seleccionados (1) y (2)

respectivamente

El desbalance total es:

$$\frac{\vec{F}}{\omega^2} = \sum_{i=1}^n m_i r_i e^{j\theta_i} = \sum_{i=1}^n m_i r_i \cos\theta_i + \sum_{i=1}^n m_i r_i \sin\theta_i = m r e^{j\theta} \quad (2.6)$$

Al agregar las masas en los planos elegidos, la ecuación de balance estático se expresa mediante la ecuación 2.7

$$\sum_{i=1}^n m_i \omega^2 r_i e^{j\theta_i} + m_{b1} \omega^2 r_{b1} e^{j\theta_{b1}} + m_{b2} \omega^2 r_{b2} e^{j\theta_{b2}} = 0 \quad (2.7)$$

La ecuación 2.7 se divide en 2

$$\sum_{i=1}^n m_i r_i \cos\theta_i + m_{b1} r_{b1} \cos\theta_{b1} + m_{b2} r_{b2} \cos\theta_{b2} = 0 \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i r_i \sin\theta_i + m_{b1} r_{b1} \sin\theta_{b1} + m_{b2} r_{b2} \sin\theta_{b2} = 0 \quad (2.9)$$

Se toma momentos con respecto al plano 1 asumiendo que la masa  $m_{b1}$  está en dicho plano

$$\sum_{i=1}^n m_i \omega^2 r_i l_i e^{j\theta_i} + m_{b2} \omega^2 r_{b2} e^{j\theta_{b2}} = 0 \quad (2.10)$$

entonces:

$$m_{b2} r_{b2} \cos\theta_{b2} = \frac{- \sum_{i=1}^n m_i r_i \cos\theta_i}{l} \quad (2.11)$$

$$m_{b2} r_{b2} \sin\theta_{b2} = \frac{- \sum_{i=1}^n m_i r_i \sin\theta_i}{l} \quad (2.12)$$

Reemplazando la ecuación 2.11 en la ecuación 2.8 y la ecuación 2.12 en la ecuación 2.9 se obtiene

$$m_{b1} r_{b1} \cos\theta_{b1} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i \cos\theta_i}{l} - \sum_{i=1}^n m_i r_i \cos\theta_i \quad (2.13)$$

$$m_{b1} r_{b1} \sin\theta_{b1} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i \sin\theta_i}{l} - \sum_{i=1}^n m_i r_i \sin\theta_i \quad (2.14)$$

Dividiendo la ecuación 2.12 para la ecuación 2.11

$$\theta_{b2} = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{\sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i} \right) \quad (2.15)$$

Dividiendo la ecuación 2.14 para la ecuación 2.13

$$\theta_{b1} = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{l} - \sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{\frac{\sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i}{l} - \sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i} \right) \quad (2.16)$$

De la ecuación 2.11 y la ecuación 2.12 se tiene que:

$$m_{b2} r_{b2} = \frac{- \sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i}{l \cos \theta_{b2}} = \frac{- \sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{l \sin \theta_{b2}} \quad (2.17)$$

De la ecuación 2.13 y la ecuación 2.14 se tiene que:

$$m_{b1} r_{b1} = \frac{\frac{\sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i}{l} - \sum_{i=n}^n m_i r_i \cos \theta_i}{\cos \theta_{b1}} = \frac{\frac{\sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{l} - \sum_{i=n}^n m_i r_i \sin \theta_i}{\sin \theta_{b1}} \quad (2.18)$$

Con las ecuaciones de la 2.10 a la 2.12 se puede realizar el balanceo

#### 2.6.4. Método para determinar los coeficientes de influencia

El método de los coeficientes para dos planos es el siguiente:

- Con la máquina en funcionamiento medir amplitud y fase en los sensores  $\vec{S}_1$  (medición A) y  $\vec{S}_2$  (medición B).
- Detener el rotor y colocar una masa de prueba  $m_1$  en el plano  $z_1$ .
- Medir nuevamente amplitud y fase, a la misma velocidad (mediciones  $A_1$  y  $B_1$ )
- Detener el rotor, retirar la masa  $m_1$  y colocar una masa  $m_2$  en el plano  $z_2$
- Medir nuevamente la amplitud y fase, a la misma velocidad (mediciones  $A_2$  y  $B_2$ )

$$a_{11} = \frac{A_1 - A}{m_1} \quad (2.19)$$

$$a_{12} = \frac{A_2 - A}{m_2} \quad (2.20)$$



$$a_{21} = \frac{B_1 - B}{m_1} \quad (2.21)$$

$$a_{22} = \frac{B_2 - B}{m_2} \quad (2.22)$$

$a_{11}$  y  $a_{12}$  representan los desbalances producidos por las masas  $m_1$  y  $m_2$  en el plano  $z_1$ , en tanto que  $a_{21}$  y  $a_{22}$  representan el desbalance producido por  $m_1$  y  $m_2$  en el plano  $z_2$ .

### 2.6.5. Balanceo en dos planos usando analizador de vibraciones.

El desbalance de la máquina puede ser reemplazado por 2 pesos que se denominaran  $\vec{U}_L$  para el plano izquierdo y  $\vec{U}_R$  para el plano derecho, se usa un método similar al balanceo en un plano solo que ahora se agregan dos masas de prueba  $\vec{W}_L$  y  $\vec{W}_R$ , que se agregan a los planos izquierdo y derecho respectivamente

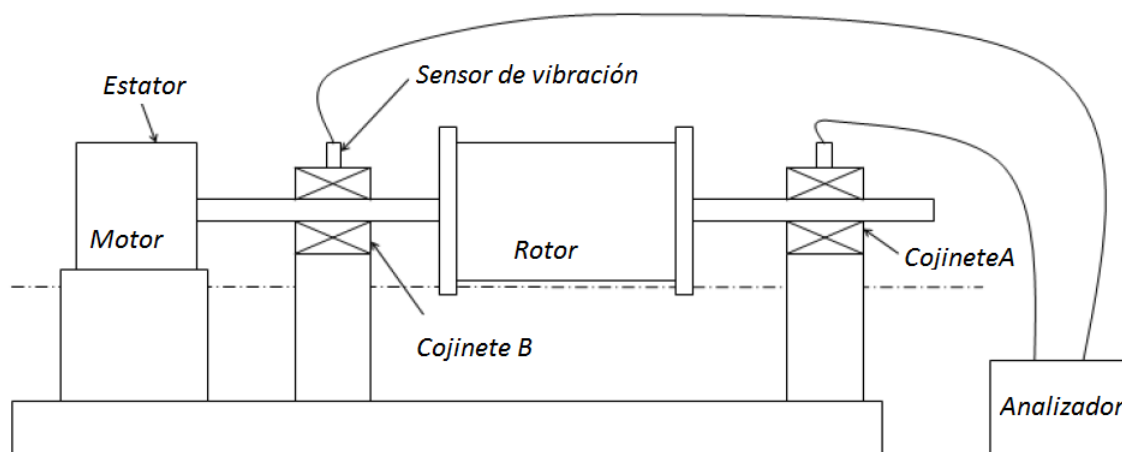


Figura 2.13: Diagrama de la máquina balanceadora en dos plano

Cada desbalance  $\vec{U}_L$  y  $\vec{U}_R$  produce vibración en los dos cojinetes que soportan el eje del rotor, por lo cual la medición en el sensor resulta:

$$\vec{V}_i = \vec{A}_{iL}\vec{U}_L + \vec{A}_{iR}\vec{U}_R \quad (2.23)$$

Los coeficientes  $\vec{A}_{ij}$  es el efecto de la vibración en el apoyo  $i$  debido a la vibración, donde  $j$  es L o R, dependiendo si es plano izquierdo o derecho respectivamente.

Usando la ecuación 2.23 la medida de la vibración en los cojinetes debido al desbalance original a la velocidad de operación del rotor es:

$$\vec{V}_A = \vec{A}_{AL}\vec{U}_L + \vec{A}_{AR}\vec{U}_R$$

$$\vec{V}_B = \vec{A}_{BL}\vec{U}_L + \vec{A}_{BR}\vec{U}_R$$

Que en forma de matriz se expresa

$$\begin{Bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{A}_{AL} & \vec{A}_{AR} \\ \vec{A}_{BL} & \vec{A}_{BR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{U}_L \\ \vec{U}_R \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

Con un masa de prueba conocida  $\vec{W}_L$ , que se agrega a un ángulo conocido y a una distancia radial conocida, en el plano izquierdo, la ecuación resultante es

$$\vec{V}'_A = \vec{A}_{AL}(\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{AR}\vec{U}_R$$

$$\vec{V}'_B = \vec{A}_{BL}(\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{BR}\vec{U}_R$$

$$\begin{Bmatrix} \vec{V}'_A \\ \vec{V}'_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{A}_{AL} & \vec{A}_{AR} \\ \vec{A}_{BL} & \vec{A}_{BR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{U}_L \\ \vec{U}_R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \vec{A}_{AL} \\ \vec{A}_{BL} \end{Bmatrix} \vec{W}_L \quad (2.25)$$

Con las ecuaciones 2.24 y 2.25 resulta:

$$\begin{Bmatrix} \vec{V}'_A \\ \vec{V}'_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \vec{A}_{AL} \\ \vec{A}_{BL} \end{Bmatrix} \vec{W}_L \quad (2.26)$$

Ordenando se tiene:

$$\begin{Bmatrix} \vec{A}_{AL} \\ \vec{A}_{BL} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (\vec{V}'_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_L \\ (\vec{V}'_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_L \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

Ahora se añade un peso de masa conocida  $\vec{W}_R$  que se agrega a un ángulo conocido y a una distancia radial conocida, en el plano derecho, y realizando el mismo procedimiento que para el izquierdo se tiene la ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \vec{A}_{AR} \\ \vec{A}_{BR} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (\vec{V}''_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_R \\ (\vec{V}''_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_R \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

Reemplazando la ecuación 2.28 y la ecuación 2.27 en la ecuación 2.24, se tiene

$$\begin{Bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{V}'_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_L & (\vec{V}''_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_R \\ (\vec{V}'_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_L & (\vec{V}''_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{U}_L \\ \vec{U}_R \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

Mediante el proceso de matriz inversa se obtiene

$$\begin{Bmatrix} \vec{U}_L \\ \vec{U}_R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{V}'_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_L & (\vec{V}''_A - \vec{V}_A)/\vec{W}_R \\ (\vec{V}'_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_L & (\vec{V}''_B - \vec{V}_B)/\vec{W}_R \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \vec{V}_A \\ \vec{V}_B \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

Con la ecuación 2.30 se obtiene el desbalance original en el rotor, por lo que debe ser balanceado colocando masas de igual magnitud pero desfasados 180 grados de  $U_j$  siendo j derecho o izquierdo

## 2.7. Selección de la masa de prueba

La masa de prueba para el balanceo, debe ser suficientemente grande para producir un cambio en la amplitud de la vibración, pero no debe ser en exceso grande, pues puede causar daño a la máquina por vibración excesiva. El criterio es que la masa de prueba origine un desbalance del 10% del peso del rotor. La carga dinámica adicional no debe exceder en 10% la carga estática

De [Sosa, ] se tiene la ecuación:

$$M_p = 321,7 \left( \frac{W_p}{N^2 r} \right) \quad (2.31)$$

Donde:

$M_p$  es la masa de prueba en gramos.

$W_p$  es la masa del rotor en Kg.

$N$  es la velocidad de rotación del eje en rpm.

$r$  es el radio al que está ubicada la masa de prueba.

## 2.8. Norma ISO 1940.

En la norma se define el desbalanceo como la condición, en la cual el eje de inercia del rotor no coincide con su eje de rotación, de esta forma el giro no es concéntrico y se produce, fuerzas y/o momentos dinámicos que dan origen a la vibraciones.

La cantidad de desbalanceamiento se calcula como:

$$U = m.r_0 \quad (2.32)$$

Donde

$U$  =cantidad de desbalanceamiento [g.mm]

$m$  =masa desbalanceada [g]

$r_0$  =distancia de  $m$  al eje de rotación. [mm]

.

Dependiendo de la geometría, distribución de masas y la velocidad del rotor, el balanceo se puede hacer en un plano (balanceo estático), en dos planos (balanceo dinámico) y en tres o mas planos. En un plano se tienen rotores cuyo largo sea mucho menor que su diámetro como volantes, ventiladores, engranajes,etc. En dos planos se tienen rotores que no tienen forma de disco y el desbalanceamiento tienden a darle un movimiento de vaivén cuando éste gira, como cigueñales, turbinas,etc. En 3 o mas planos para rotores flexibles.

En el siguiente cuadro se muestra el grado de calidad mínimo con el que deben ser balanceados los diferentes tipos de rotores. Conociendo el grado de calidad se puede conocer el desbalanceo admisible para una máquina específica.

Tabla 2.1: Grado de calidad de balanceo según ISO 1940

Calidad del balanceo	Tipo de rotor
G4000	Cigüeñales de motores (diésel) marítimos de bajas revoluciones, montados sobre soportes rígidos y con un número de cilindros impar.
G1600	Cigüeñales de motores de dos tiempos montados sobre soportes rígidos.
G630	Cigüeñales de motores de cuatro tiempos montados sobre soportes rígidos. Cigüeñales de motores (diésel) marítimos montados sobre soportes elásticos.
G250	Cigüeñales de motores (diésel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre soportes rígidos.
G100	Cigüeñales de motores (diésel) de seis o más cilindros y de alta velocidad. Cigüeñales de motores de combustión interna (gasolina, diésel) para carros y ferrocarriles.
G40	Ruedas y llantas de carros. Cigüeñales de motores de cuatro tiempos de alta velocidad (gasolina, diésel) sobre soportes elásticos y con seis o más cilindros.
G16	Ejes de propelas, ejes de transmisiones cardánicas. Elementos de máquinas agrícolas. Componentes individuales de motores (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles. Cigüeñales de motores de seis o más cilindros bajo requerimientos especiales.
G6.3	Elementos de máquinas procesadoras en general. Engranajes para turbinas de uso marítimo. Rodillos para máquinas papeleras. Ventiladores. Rotores de turbinas para la aviación. Impelentes para bombas. Máquinas herramienta. Rotores de motores eléctricos.
G2.5	Turbinas de gas y de vapor. Rotores rígidos para turbogeneradores. Discos para computadoras. Turbocompresores. Bombas operadas por turbinas.
G1	Grabadoras de cinta magnética y tocadiscos convencionales. Máquinas trituradoras.
G0.4	Discos compactos, brocas, barrenas. Giróscopos.

Fuente:[M., 2006]

### 2.8.1. Usando la norma.

Para el uso del estándar se debe seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar un grado de calidad G del cuadro de Grado de calidad de balanceo según ISO 1940, basándose en el tipo de rotor.
2. Usar la figura siguiente para determinar el valor permisible residual específico de desbalance  $e_{per}$  seleccionando la máxima velocidad de rotación en trabajo,

luego multiplicar  $e_{per}$  por el peso del rotor para obtener el desbalance permisible residual  $U_{per}$

3. Para obtener la masa máxima de desbalance permitida, calcular la masa dividiendo  $U_{per}$  para el radio donde se colocaron las masas de prueba.

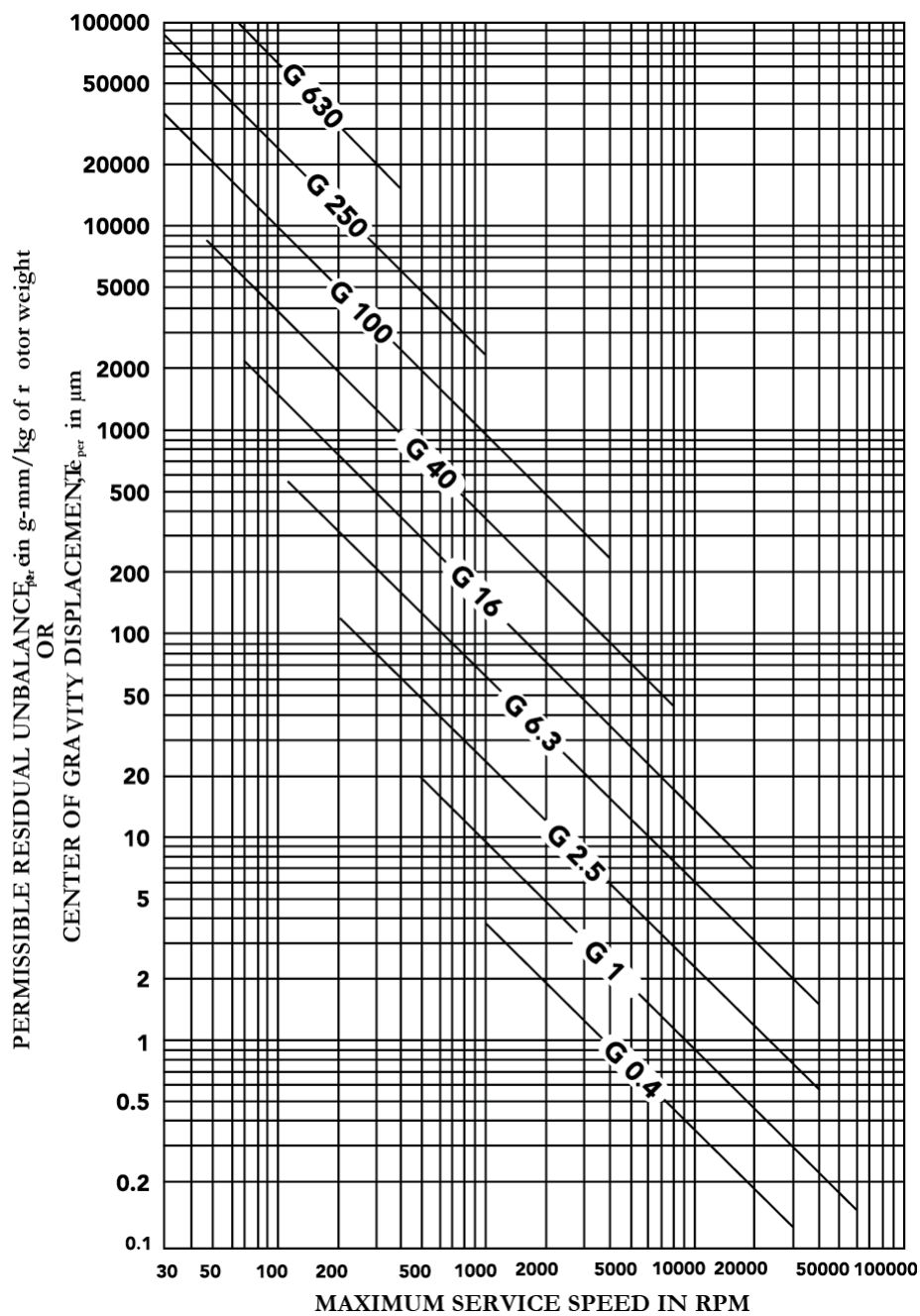


Figura 2.14: Valor permisible residual específico de desbalance  
Fuente:[Balancing, 2009]

## 2.9. Máquinas de balanceo.

La función principal de estas máquinas es analizar las vibraciones de un elemento giratorio para determinar si el mismo está equilibrado, y de no estar equilibrado, estable la magnitud en masa y la ubicación del desbalanceo.

### 2.9.1. Balanceo en taller

El balanceo en taller es debido a que el rotor debe ser desmontado de su lugar de trabajo y ser transportado hasta el lugar en donde se encuentra la máquina balanceadora

La máquina balanceadora cumple con 3 funciones principales:

- Soportar el rotor a ser balanceado
- Girar el rotor a una velocidad establecida
- Medir el efecto dinámico ocurrido por el desbalance y determinar los pesos de corrección en cada plano de balanceo

Independientemente de si la máquina es de rotores rígidos o flexibles, deben medir la amplitud y ángulo de fase de las fuerzas que se aplican en los apoyos por la vibración.

### 2.9.2. Balanceo en sitio

El balanceo en sitio es debido a que el rotor no es desmontado sino que se lo balancea en su lugar de trabajo.

La instrumentación en sitio es modesta, se requiere de sensores acelerómetros, dependiendo si es para uno o dos planos, uno o dos sensores respectivamente y un sensor que permita obtener las revoluciones y la posición angular que podría ser un estroboscopio, encoder, láser, entre otros.

Tiene la ventaja de que con la medida de las vibraciones en sitio se puede determinar otros problemas de la máquina, como cambio de rodamientos o pata coja.

### 2.9.3. Balanceo en taller vs en sitio

Si el rotor trabaja a velocidades bajas, un balanceo en taller puede ser adecuado para todo el rango de operación, de igual forma si el rotor trabaja a velocidades moderadamente altas pero continua comportándose como rígido, el balanceo en taller puede ser suficiente.

Si la velocidad de trabajo se aproxima o excede a la velocidad crítica, a la cual el rotor ya sufre una deflexión sustancial, se lo debe balancear en sitio.

Según [David Bukowitz, ]: Se puede establecer como regla general que:

“Los rotores que operan a velocidades por debajo del 75 % de su primera velocidad crítica son considerados rígidos y el balanceo en taller es adecuado. Mientras que los rotores que operan por encima del 75 % de su primera velocidad crítica son considerados flexibles y requieren ser balanceados en sitio a sus condiciones de operación”

#### **2.9.4. Clasificación.**

Las máquinas balanceadoras se clasifican según el sistema que utilizan para la sujeción del eje, que pueden ser de soportes rígidos o de soportes flexibles.

##### **2.9.4.1. Rotores rígidos.**

La velocidad de operación de este tipo de máquinas es a velocidades inferiores a su frecuencia natural.

Tienen la ventaja de requerir una sola calibración para todo su ciclo de operación.

Tienen la desventaja de requerir una base muy pesada y rígida.

##### **2.9.4.2. Rotores flexibles.**

La velocidad de operación de este tipo de máquinas es a mayor velocidad de su frecuencia natural, sus soportes son mucho menos rígidos, por lo que permiten mayor movilidad del eje al girar.

La mayor parte de los esfuerzos producidos por la fuerza centrífuga son absorbidos por la propia inercia del motor y no se transmiten a los soportes, creando una gran atenuación a la vibración transmitida a la base de la máquina, de igual forma a la vibración transmitida a las estructuras cercanas.

Una ventaja de este tipo de máquinas es que no requiere una base tan pesada y rígida como su contra parte, por lo que el costo es mas económica y puede ser transportable.

Tienen la desventaja de necesitar calibración para cada tipo de rotor, pues el desplazamiento de los soportes depende de la distribución de la masa en el rotor.

#### **2.9.5. Generalidades TIRA K300.**

La máquina balanceadora K300 de la empresa alemana TIRA Auswuchttechnik, balancea de manera horizontal en uno o dos planos.

El código del nombre significa :

K que tiene soportes rígidos.



300 significa el peso máximo de 300 kg que puede tener un rotor.

### **2.9.6. Datos Técnicos.**

- Peso del rotor, de 3 hasta 300 kg
- Diámetro máximo del rotor: 1000mm
- Diámetro del eje: 15-120mm
- Velocidad de balanceo: invariable aprox 325/650rpm aprox 875/1750
  - invariable aprox 325/650rpm aprox 875/1750
  - 1750rpm: 3-30 Kg
  - 650rpm: 30-100kg
  - 325rpm: 100-300kg
- Consumo de potencia: aprox. 6KVA 220V trifásico
- Peso de la máquina: aprox. 1250 kg

## Capítulo 3

# INTRODUCCIÓN DEL SISTEMA

### 3.1. Descripción

#### 3.1.1. Componentes de la máquina

La máquina balanceadora TIRA K300 consta de los siguientes componentes:

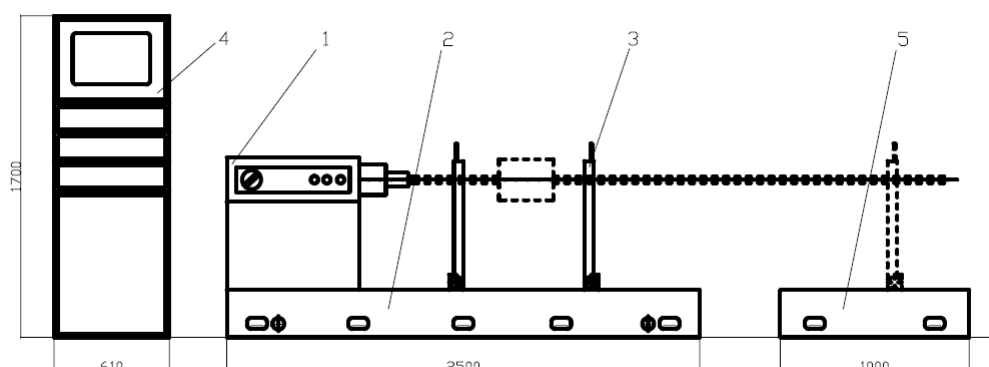


Figura 3.1: Componentes de la balaceadora TIRAK300

1. Caja del motor: Caja en la cual se encuentra el motor, con su reducción mediante poleas y también se encuentra el sensor encorder para la medición de la posición durante el giro.
2. Plataforma de la máquina: La plataforma sobre la cual se asienta la máquina, debe ser hecha por fundición para que sea capaz de resistir la vibración a la cual será sometida.
3. Soportes removibles y móviles: Usados como apoyo para el eje, para que el mismo pueda girar, se puede regular la altura para que se encuentre alineado.

4. Armario de control: Usado como protección para la parte de control, potencia y pantalla de la máquina.
5. Plataforma adicional: Usada para tener una mayor longitud posible para un rotor, cuenta con un espacio entre la plataforma de la máquina y la adicional para colocar rotores de un diámetro mayor.

### 3.1.2. Panel de control

En la caja del rotor, se encuentran pulsadores de control de la balanceadora TIRA K300, que controlan el movimiento o paro del motor y las dos velocidades a la cual puede girar.

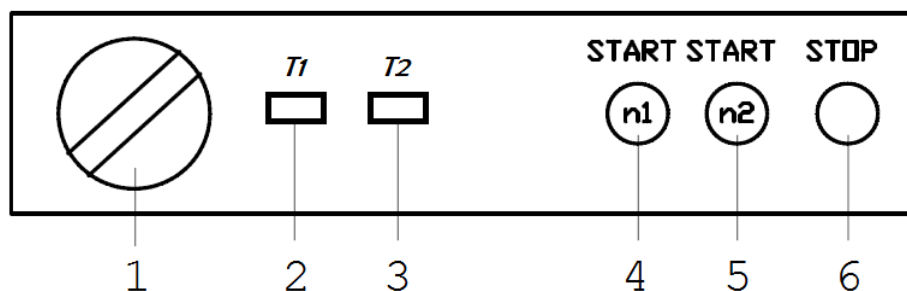


Figura 3.2: Panel de Control

1. Interruptor de encendido/apagado: Interruptor que controla las 3 fases que alimentan la máquina.
2. Pulsador para control ventanas interfaz (T1). Botón que permite el cambio de ventana de la interfaz a la ventana de la izquierda.
3. Pulsador para control ventanas interfaz (T2). Botón que permite el cambio de ventana de la interfaz a la ventana de la derecha.
4. Pulsador de giro a baja velocidad (n1). Botón que inicia la operación del motor en baja velocidad.
5. Pulsador de giro a alta velocidad (n2). Botón que inicia la operación del motor en alta velocidad.
6. Pulsador de parada. Detiene el movimiento del motor.

## 3.2. Características

### 3.2.1. Procedimiento para la adquisición de datos

Los datos obtenidos por el transductor pueden ser analizados directamente o pueden ser guardados para ser almacenados luego de un cierto tiempo de toma de datos.

A partir de estos datos, se puede graficar la onda de vibración en función del tiempo o para obtener mayor información se realiza un análisis de espectros FFT .

El arreglo usado para la adquisición se indica en la siguiente figura:

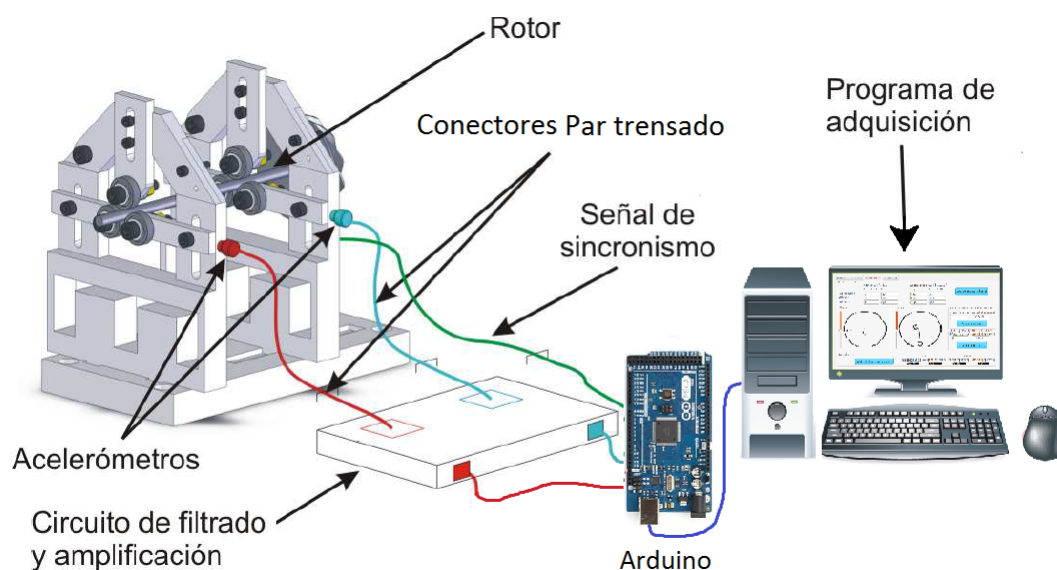


Figura 3.3: Esquema de adquisición de datos

### 3.2.2. Selección de medida

Debemos seleccionar la medida para la vibración que puede ser desplazamiento, velocidad o aceleración, esta depende de muchos factores, como se indica en la siguiente figura

Información deseada o propósito:	
Movimiento	} Desplazamiento
Esfuerzo	
Fatiga, Velocidad	
Fuerza, Aceleración	
Tipo de máquina:	
Bomba	
Caja de engranajes	
Motor	
Velocidad de la máquina:	
Frecuencias	
Sensibilidad:	
Rango de frecuencias	
Tipo de máquina	
Velocidad de la máquina	

Figura 3.4: Factores de selección de medida

Fuente:[Ronald L. Eshleman, 2002]

De manera práctica para la máquina TIRA K300 se puede seleccionar la medida en función de su frecuencia, pues las tres velocidades que tiene son bajas.

MEDIDA	RANGO DE FRECUENCIA ÚTIL	SENSIBILIDAD DEL TRANSDUCTOR TÍPICO	PARÁMETRO FÍSICO	APLICACIÓN
Desplazamiento	20Hz	Acelerómetro doble integración	Esfuerzo y Movimiento	Movimiento estructural (Absoluto)
	0 – 1,000Hz	Sensor de proximidad: 200 mV/mil		Movimiento entre los cojinetes y la carcasa de la máquina (Relativo)
Velocidad	10 – 1,000Hz	Sísmico 500 mV/pulg/seg. o Acelerómetro integrado	Fatiga y Energía	Condición general de la Maquinaria que involucra vibraciones de frecuencias medias.
Aceleración	25 – 50,000Hz 5 – 10,000Hz	Acelerómetro 10 mV/g Acelerómetro 100 mV/g	Fuerza	Condición general de la Maquinaria: que indica vibraciones de medias y altas frecuencias.

Figura 3.5: Rango de frecuencias

Fuente: [Ronald L. Eshleman, 2002]

Para la máquina TIRA K300 por lo tanto se usará el desplazamiento.

### 3.2.3. Selección del transductor

Luego de elegir la medida, se debe seleccionar un transductor para obtener dicha medida. Es recomendable obtener un transductor que adquiera los datos directamente en la medida seleccionada, pero pocas veces esto es posible.

Para la selección del transductor se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- Lugar de medición: Se debe ubicar el transductor lo mas cercano posible al origen de la vibración, en nuestro caso a los apoyos o cojinetes
- Información deseada: Se debe definir en que dirección se necesita la medida seleccionada, axial, normal o vertical al eje.
- Posición: Se debe colocar el sensor en la dirección deseada, de manera general la posición para medir vibración es normal al eje.
- Espacio: Se debe seleccionar un sensor que sea adecuado al espacio que se tiene en la máquina, incluyendo el cable que transmite los datos.
- Ambiente: Se deben tomar todas las medidas necesarias de seguridad para el sensor y para el cable que transmite los datos en función del lugar de instalación de la máquina.

El transductor original de la máquina es un sensor piezoelectrico, que esta unido a una placa que consta de un amplificador seguidor y un amplificador inversor.

Al realizarse pruebas, el sensor estaba en correcto estado pero el chip de la placa estaba quemado, por lo que se mantuvo el sensor y se realizaron nuevas placas para los mismos.

### 3.2.4. Ubicación del transductor

El transductor debe ser ubicado lo mas cerca de la fuente de vibración en la medida de lo posible. Debido a esto el montaje depende del diseño de la máquina, en la máquina TIRA K300, ya se cuenta con el espacio para el transductor, el cual mide en la dirección radial (normal) al eje

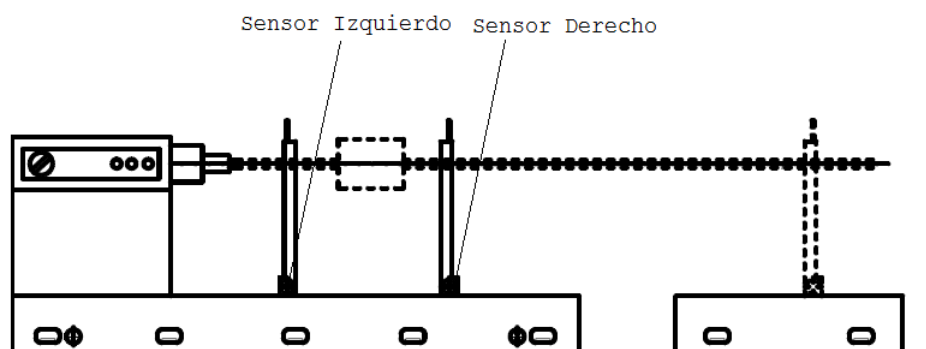


Figura 3.6: Ubicación Sensores

### **3.2.5. Acondicionamiento de la señal**

El transductor piezoeléctrico genera un voltaje al deformarse, este voltaje es de magnitud muy pequeña por lo que se usa un amplificador en configuración seguidor para luego usar otro amplificador en configuración no inversor, dándole una ganancia de 10 , todo esto se lo hace en la placa que se encuentra junto al transductor.

Luego de esto la señal obtenida debe ser filtrada pues se necesita solo frecuencias bajas ya que la máquina tiene una velocidad máxima de 760 r.p.m. que equivale a 12.67 Hz

El análisis que se efectúa es en 1X , pues a 2X y 3X se lo hace en el lugar de trabajo, siendo estas para detectar otros problemas como se indica en la figura siguiente.

Se usa un integrado LTC1063, que es un filtro pasa bajos Butterworth de quinto orden, de frecuencia de corte regulable mediante un reloj externo o interno al mismo, la frecuencia del reloj del mismo y el de la frecuencia de corte tiene una relación de 1:100, por lo que la frecuencia de reloj usada es 1200 Hz.

Falla	Frecuencia	Espectro / Dominio del tiempo / Forma de órbita	Corrección
Desbalance de masas	1X	1X preciso con valores más bajos de 2X, 3X, etc., órbitas circulares y elípticas	Balanceo en campo o en taller
Desalineamiento	1X, 2X, etc.	1X preciso con valores iguales o superiores a 2X, 3X etc., órbita en forma de ocho.	Alinear en frío o en caliente
Eje deflexionado	1X	Disminuye la vibración alrededor de la velocidad crítica en el diagrama de Bodé.	Alivio de tensiones por golpeteo o martilleo para enderezar el rotor.
Carga de vapor	1X	Carga sensitiva 1X	Modificar la secuencia de admisión. Reparar diafragmas. instalar apropiadamente las toberas.
Desgaste del rodamiento	1X, subarmónicas, órdenes	1X Elevado, ½ X Elevado, algunas veces 1 ½ u órdenes; no puede ser balanceado.	Reemplazar los cojinetes
Excitación de la gravedad	2X	½ de la Velocidad crítica aparece en el diagrama de Bodé (sin filtrar)	Reducir la excentricidad mediante balanceo.
Rotor asimétrico	2X	½ de la Velocidad crítica aparece en el diagrama de Bodé (sin filtrar)	Eliminar asimetría
Rotor rajado	1X, 2X	1X Elevado, ½ críticas pueden aparecer en la parada.	Retirar el rotor
Solturas	1X, 2X, 3X, etc. también puede aparecer órdenes ½ X.	1X Elevado, con órdenes de nivel inferior, orden de ½ elevados	Utilizar laminas y ajustar los pernos para obtener mayor rigidez
Acoplamiento trabado	1X, 2X, 3X, etc.	1X con alto 2X similar al desalineamiento. En cada arranque no se repiten los ángulos.	Reemplazar el acoplamiento o eliminar sedimentos y lubricar
Inestabilidad térmica	1X	1X presenta variación en la amplitud y en el ángulo de fase.	Evaluar entre balancear o eliminar el problema.
Distorsión	1X y múltiplos más altos	Señal 1X recortada.	Eliminar la pata coja

- 1X = una vez la velocidad de operación

Figura 3.7: Identificación y corrección de funcionamientos defectuosos

Fuente: [Ronald L. Eshleman, 2002]

### 3.2.6. Muestreo

Para analizar la señal del tiempo se necesita de un bloque de datos a un régimen de muestreo, este bloque debe contener al menos un ciclo completo de la señal para ser procesada, por lo que debido a que la señal tiene una baja frecuencia, con un máximo





Siendo la componente de frecuencia mas alta de una señal  $f_{max}$ , la frecuencia de muestreo  $f_{adq}$  debe ser al menos el doble de dicha frecuencia para poder reconstruir la señal completamente según el teorema de Nyquist-Shannon.

$$f_{adq} \geq 2f_{max}$$

Si este criterio no se cumple y la  $f_{adq}$  es menor que dicho valor se puede tener otra componente de frecuencia coincidente con el muestreo realizado como se muestra en la figura siguiente:

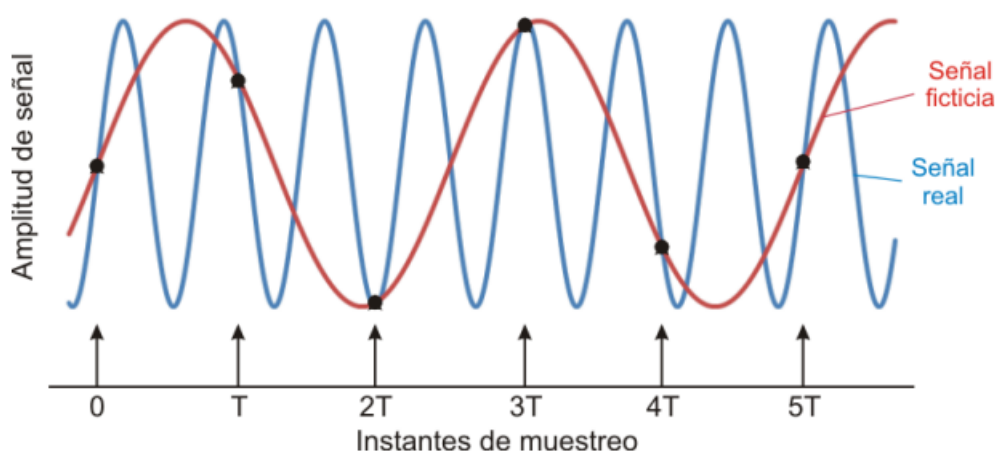


Figura 3.10: Ejemplo de Aliasing  
Fuente: [Carella, ]

### 3.2.6.2. Supresor de Aliasing

Para evitar este problema, se debe modificar los parámetros para que cumpla con el teorema de Nyquist. Esto se puede hacer de dos formas:

- Aumentar la frecuencia de adquisición de datos  $f_{adq}$
- La segunda es por reducir la frecuencia máxima  $f_{max}$  de la señal mediante filtros pasa bajos

Un filtro pasa-bajos ideal es un dispositivo que tiene una ganancia de 1 para frecuencias que sean menores a la de corte  $f_c$  y que sea 0 para frecuencias superiores.

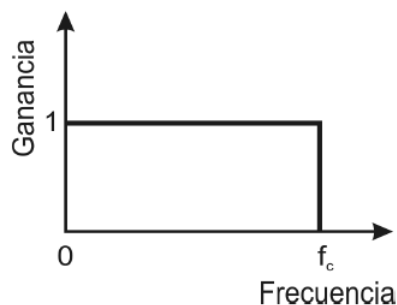


Figura 3.11: Función de transferencia ideal para un filtro pasa bajos.

Fuente: [Carella, ]

### 3.3. Funcionamiento

#### 3.3.1. Dominio del tiempo

En el dominio del tiempo se aprecia la aceleración por la vibración que tiene la máquina, pues el sensor piezoeléctrico da un voltaje con respecto a la aceleración, en la misma se puede apreciar el periodo fundamental, al igual que el pico de la señal.

Las vibraciones en la mayoría de casos se repiten en el tiempo a intervalos iguales, siendo estas ondas periódicas.

Si la onda fuese armónica, pues se expresa por una función sinusoidal, se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$\text{RaízMediaCuadrática} = \sqrt{2}\text{Pico}$$

$$\text{PicoaPico} = 2 * \text{Pico}$$

Si la señal no es armónica, pues presenta en ella mas de una frecuencia, estas ecuaciones no son válidas

En la mayoría de máquinas, las vibraciones que se producen son periódicas pero no armónicas. Al ser periódico, la señal se repite en el tiempo pero no puede ser representado directamente por una señal sinusoidal sino por la unión de varias señales sinusoidales a distintas frecuencias.

### 3.3.2. Relación entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración

Si la señal es armónica, se pueden relacionar estas magnitudes, pues mediante el transductor solo obtenemos una de ellas. La señal de la velocidad se adelanta 90 grados con respecto al desplazamiento en fase y se retrasa con respecto a la aceleración en 90 grados.

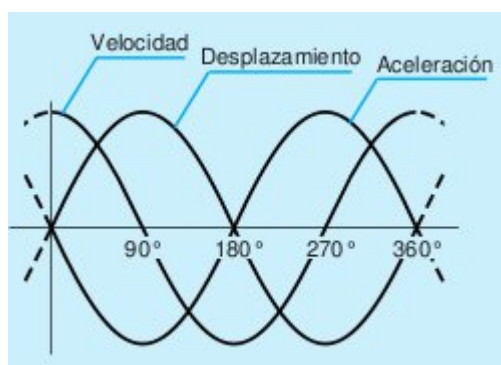


Figura 3.12: Gráfica desplazamiento, velocidad, aceleración

En el siguiente cuadro se muestran las relaciones entre desplazamiento, velocidad y aceleración

PARAMETRO	AMPLITUD	FASE (Radianes)
Desplazamiento	$D$	$0$
Velocidad	$D\omega$	$\pi/2$
Aceleración	$D\omega^2$	$\pi$

Figura 3.13: Relación entre desplazamiento, velocidad, aceleración  
Fuente: [Ronald L. Eshleman, 2002]

### 3.3.3. Ángulo de fase.

El ángulo de fase es la ubicación en el eje del pico mayor de vibración en una revolución, y se lo determina como indica el siguiente gráfico

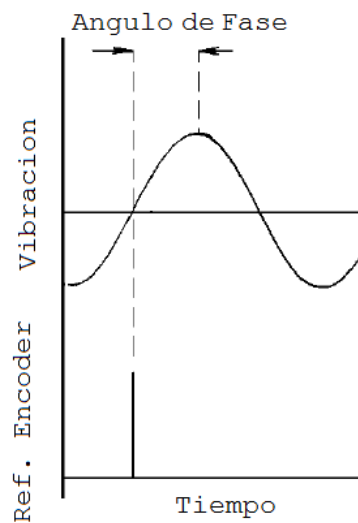


Figura 3.14: Determinación de la fase  
Fuente: [Ronald L. Eshleman, 2002]

La señal de referencia del encoder esta dado por el canal del mismo que indica la posición 0, y el ángulo de fase se obtiene al tomar el valor del encoder cuando el valor de la aceleración es máximo.

## Capítulo 4

# SISTEMA ELÉCTRICO/ ELECTRÓNICO

### 4.1. Descripción del sistema eléctrico y electrónico.

El sistema eléctrico y electrónico implementado en la maquina balanceadora de rotores, tiene como función principal de controlar e intercambiar datos del proceso de balanceo, la información es procesada para determinar la magnitud y ubicación del desbalanceo del rotor de prueba.

### 4.2. Elementos del Sistema eléctrico.

#### 4.2.1. Fusibles.

El fusible es un aparato de maniobra, cuya función principal es la de proteger contra la sobrecarga de corriente eléctrica, este se desconecta automáticamente cuando la corriente excede un determinado valor.



Figura 4.1: Fusibles

Los fusibles que se utilizan en la balanceadora son del tipo gR y gL, según la norma IEC 60269-1.

La primera letra indica:

g: fusible limitador de corriente, actúa tanto en presencia de corrientes de cortocircuito como en sobrecarga.

La segunda letra indica:

L: fusible para protección específica de líneas.

R: fusible de actuación rápida o ultra-rápida para protección de circuitos con semiconductores de potencia.

Tabla 4.1: Características técnicas fusibles

APLICACIÓN.	TIPO.	INTENSIDAD NOMINAL.	VOLTAJE.
Arrancador.	gR	35 A	660 VAC
Freno.	gL	25 A	500 VAC
Circuito de control.	gL	10 A	230 VAC
Tomacorrientes polarizados.	gL	6 A	230 V

Fuente: [IEC, ]

#### 4.2.2. Relé térmico.

El relé térmico es un elemento de protección contra sobrecargas, actúa bajo el efecto del calor, deformando placas bimetales para realizar la apertura automática de contactos auxiliares que corten la energía del circuito cuando se alcanza el calentamiento límite.

Los relés térmicos en uso de la balanceadora K300 son relés térmicos Siemens 3UA52 00-2C, los cuales tiene los siguientes datos técnicos.



Figura 4.2: Relé térmico

Fuente: [Molina, 1998]

Características Físicas.

- Protección de falta de fase.

- Botón de RESET (azul).
- Compensación de la temperatura ambiente.
- Botón TEST (rojo).
- Terminal para bobinas del contactor.
- Rango de Temperatura: -25 C – 55 C.
- Contactos auxiliares: 1NO y 1 NC.

#### Características Técnicas.

- Voltaje nominal: 220VAC.
- Corriente: Hasta 25 A.
- Voltaje de aislamiento de  $U_i$ : 690 V.
- Voltaje mínimo  $U_{imp}$ : 6 V.
- Sección del conductor. Solido o multifilar: de 2.5 – 6 mm<sup>2</sup>.
- Perdida de potencia por polo. o Mínima: 0.9 W. o Máxima: 2.25 W.

### 4.2.3. Arrancador MINISTART 5.5 B.

Un arrancador es un dispositivo eléctrico que limita la corriente de arranque del motor, evitando sobrecargas y llevándolo hasta su velocidad nominal.



Figura 4.3: MINISTART 5.5 B



#### **4.2.3.1. Indicadores operacionales.**

Cuatro LEDs, que se encuentran por debajo de una ventana de la pantalla, muestran los estados de funcionamiento del MINISTART.

- LED verde "SUMINISTRO" iluminado = MINISTART listo para funcionar
- LED amarillo derecha "START" iluminado = arranque suave se selecciona mediante la entrada
- LED amarillo "BYPASS" izquierda iluminada = semiconductores energía se omiten
- LED rojo "FAULT" iluminado = fallo

#### **4.2.3.2. Características Técnicas.**

- Voltaje de motor (DIN EN 50160): 400 V +/- 15 %.
- Potencia (a 230V): 3.5 KW.
- Carga mínima del motor: 10 % de la potencia del motor 0.55KW.
- Torque de inicio: 0-80 %.
- Tiempo de aceleración: 1-20s.
- Torque de parada suave: 20-80 %.
- Tiempo de aceleración: 0-20s.
- Tiempo de Reset: 200ms.
- Tensión de red: 400/415V 50/60Hz.
- Corriente nominal del equipo: 12A.
- Máxima potencia del motor: 5.5Kw.
- Máxima corriente de frenado: 22A.
- Temperatura de operación: -25... 75°C.
- Peso: 1.35Kg.

#### 4.2.4. Freno BR220-20.

El freno de la serie BR220-20 actúa, junto con el arrancador MINISTART 5.5B, para realizar un frenado suave del motor.



Figura 4.4: Freno BR220-20.

##### 4.2.4.1. Características Técnicas.

- Compatible con cualquier tipo de motor asíncrono.
- Soporta voltajes mayores a 600 V para dispositivos de 20 A y voltajes mayores a 690 V para dispositivos de 40 A.
- Fácil instalación, para montaje sobre una riel DIN 35 mm.
- Leds indicadores de acción/falla del dispositivo. • Voltaje nominal: 220V/240V +/- 10V.
- Frecuencia: 50/60 Hz.
- Corriente: 20A.
- Frenado por DC.
- Dos parámetros ajustables: corriente de frenado y tiempo de frenado.

Actualmente este dispositivo no se comercia.

#### 4.2.5. Contactor.

El contactor es un dispositivo que se encarga de interrumpir la corriente en un circuito eléctrico y funciona a través de un mando a distancia. Los contactores en uso

de la balanceadora K300 son contactores Siemens 3TF-3300-0A, con los siguientes datos técnicos.



Figura 4.5: Contactor

#### 4.2.5.1. Características Técnicas.

- Voltaje nominal de la bobina: 220 VAC 60Hz.
- Voltaje nominal: 220/230 VAC.
- Numero de polos: 3.
- Frecuencia: 60 Hz.
- Potencia nominal: 7.5 HP.
- Siemens contactor con calificación AC3 de 22amperes.
- Siemens contactor 22A adecuado para la carga del motor de 11kw hasta en tres fases.
- Contactos auxiliares disponibles por separado.

#### 4.2.6. Motor eléctrico

Un motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, todo logrado a través de diferentes interacciones electromagnéticas, hay dos tipos de motores: motores monofásicos y trifásicos, los motores trifásicos son los más utilizados.

El motor usado en la maquina balanceadora K300 es un motor Dahlander Siemens LA5107 -0AA90-Z con un solo devanado, este tipo de motores de dos velocidades, se construyen con un devanado trifásico normal, pero conectado interiormente de tal

forma, que según se conecte los bornes exteriores a la red, el motor tendrá un número de polos u otro distinto, pero siempre doble el uno del otro; por tanto tendrá dos velocidades de rotación, una doble que la otra.



Figura 4.6: Motor eléctrico Dahlander  
Fuente: [Pareja, ]

#### 4.2.6.1. Características técnicas.

- Accionamiento: Magnético.
- Frecuencia: 60Hz.
- Conexión: 220V delta/ estrella estrella.
- Corriente: 11.4/15.5 A.
- Potencia: 3.0/3.6 KW.
- Velocidad: 1705/3485 rpm.

### 4.3. Elementos del Sistema electrónico.

#### 4.3.1. Sensores.

Los sensores usados para medir el desplazamiento provocado por las vibraciones, son llamados sensores piezoeléctricos, el cual es un dispositivo formado por materiales cerámicos o cristales iónicos que generan una pequeña cantidad de energía eléctrica cuando son deformados.



Figura 4.7: Sensor piezoeléctrico

#### 4.3.1.1. Características Técnicas.

- Funcionamiento hasta valores de 150n; 3,3K.

#### 4.3.2. Encoder

El encoder es un dispositivo electromagnético usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor. El encoder que se usa en la maquina balanceadora de rotores es un encoder del tipo incremental, el cual brinda la posición angular, punto de referencia de giro y velocidad angular.

Cuenta con 3 canales, dos para detectar el giro y el sentido del mismo y uno que se usa como referencia, pues da un pulso a cada revolución del eje.

##### 4.3.2.1. Características Técnicas.

- Encoder de 3 canales.
- Funcionamiento a 5 V.
- 500 pulsos por revolución.

#### 4.3.3. Integrado TLC082CP

La familia TL08xx son amplificadores operacionales JFET. Cada uno de estos amplificadores operacionales incorpora un bien adaptado, de alta tensión JFET y transistores bipolares en un circuito integrado monolítico. La características de estos dispositivos son altas velocidades de respuesta, polarización de entrada baja y corrientes offset, y bajo coeficiente de temperatura de tensión de offset. Incorpora ajuste de offset.

Tabla 4.2: Características integrado TI082CP

Característica	Detalle
Conteo de Pines	8
Densidad Típica de Ruido de Tensión de Entrada	18nV/Hz
Dimensiones	9.81 x 6.35 x 4.57mm
Ganancia de Tensión Típica	106,02 dB
Número de Canales por Chip	2
Producto de Ancho de Banda de Ganancia Típica	3MHZ
Slew Rate Típico	13V/ $\mu$ s
Temperatura de Funcionamiento Mínima	0 °C
Temperatura Máxima de Funcionamiento	+70 °C
Tensión de Alimentación Dual Típica	$\pm 12$ V, $\pm 15$ V, $\pm 5$ V, $\pm 9$ V
Tipo de Amplificador	Uso General
Tipo de Encapsulado	PDIP
Tipo de Fuente de Alimentación	Doble
Tipo de Montaje	Montaje en orificio pasante

Presenta los pines de conexión como se presenta en la figura siguiente

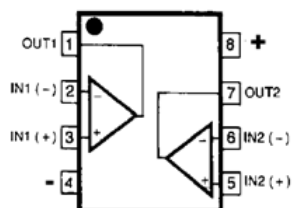


Figura 4.8: Pines de conexión del integrado TLC082CP

#### 4.3.4. Integrado LTC1063.

Este integrado cuenta con un filtro monolítico, con cambio por reloj, bajo offset de salida DC y 12-bits de precisión. La respuesta en frecuencia del LTC1063 se aproxima a un filtro Butterworth polinomial de 5to orden.

Tabla 4.3: Características Integrado LTC1063

Característica	Detalle
Frecuencia de corte regulable	50kHz (Máxima frecuencia de corte)
Offset	1mV DC
Fuente de alimentación	De +-2.375 a +-8V
Reloj interno	Un capacitor y una resistencia
Carcasa	8-Pin DIP
Filtro	Antialiasing
Relación Reloj, frecuencia corte	100:1
Salida	0.01 % THD a 2Vrms
Ruido	95uVRMS total ruido de banda ancha
Rechazo de ruido	80 dB CMRR (típico)

Presenta los pines de conexión como se presenta en la figura siguiente

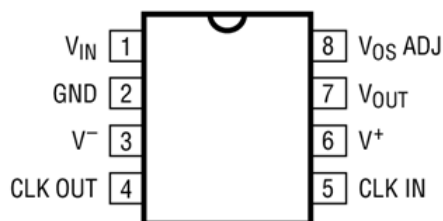


Figura 4.9: Pines de conexión del integrado LTC1063

#### 4.3.5. Integrado LM7805.

La serie LM78XX es una serie de terminales reguladores de voltaje, disponibles en el paquete T0-220, el LM7805 tiene una salida de 5 voltios, esta serie de integrados cuenta con una protección para limitación de corriente interna, apagado por temperatura . Con un disipador correctamente implementado puede entregar hasta 1 Amp de corriente.

Tiene una tolerancia a la salida del voltaje de  $\pm 5\%$ , por debajo de los 25 grados centígrados

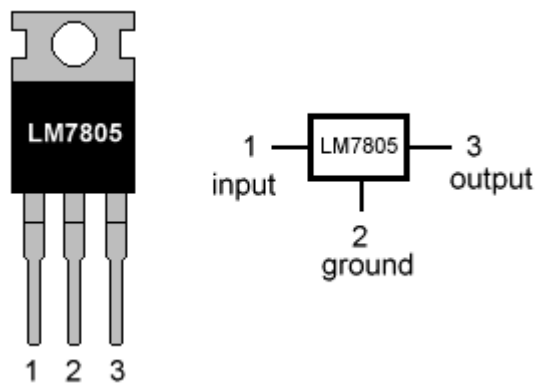


Figura 4.10: Integrado 7805

### 4.3.6. Optoacoplador 4N26.

El dispositivo 4N26 consiste en un diodo emisor infrarrojo de galio acoplado de manera óptica a un fototransistor de silicio monolítico.

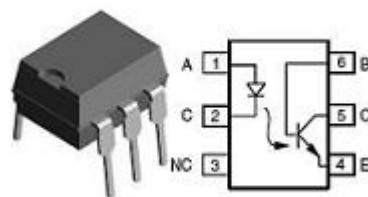


Figura 4.11: Integrado 4n26

Tabla 4.4: Características integrado 4N26

Características	Detalle
Voltaje de entrada al led	Típico 1.15V Max 1.5V
Rango de temperatura de operación	De -55 a +100 grados C
Disipación de calor	150mW
Corriente salida	Máx 150 mA
Voltaje de salida	Máx 70V

## 4.4. Diseño de las Tarjetas electrónicas.

### 4.4.1. Tarjeta electrónica de riel.

La placa electrónica está diseñada para que permita el encendido del motor únicamente si el relé K1 está accionado, las señales de 24 VDC de los botones T1 y T2



están conectadas directamente a los pines 12 y 25 respectivamente, el pin 9 recibe la señal del indicador de funcionamiento del motor, el cual nos indica el accionamiento del motor, el control del relé K3 está dado por el pin 5, la conexión total de la placa está dada por la siguiente tabla.

Tabla 4.5: Conexión de tarjeta de riel con el circuito de potencia

Pin	Pines de la placa electrónica.	Función	E/S
1	Pin 20.	N/A.	
2	Pines: 6, 8, 10, 11, 14,18.	Tierra.	
3	Jumper, no está conectado.	N/A.	
4	Jumper, no está conectado.	N/A.	
5	Jumper, si está conectado.	Enciende K3.	S
6	Diodo.	N/A	S
7	Jumper, no está conectado.	N/A.	
8	Jumper, no está conectado.	N/A.	
9	Jumper (Ver plano de potencia).	Funcionamiento del motor.	E
10	Jumper, no está conectado.	N/A.	
11	Jumper, no está conectado.	N/A.	
12	Pin 7 (Pl. potencia.).	Botón T2.	E
13	Pines: 4,17, (Pin 15 del DB-25)	Drive +24V.	
14	Pin 19.	N/A.	
15	Pin 17 (Ver plano de potencia).	+24V.	
16	Jumper, no está conectado.	N/A.	
17	Jumper, no está conectado.	N/A.	
18	Jumper no conectado (Pl potencia).	N/A.	
19	No está conectado	N/A.	
20	Jumper, no está conectado.	N/A.	
21	Jumper, no está conectado.	N/A.	
22	No está conectado.	N/A.	
23	Jumper, no está conectado.	N/A.	
24	Jumper, no está conectado.	N/A.	
25	Pin 5 (Ver plano de potencia).	Botón T1.	E

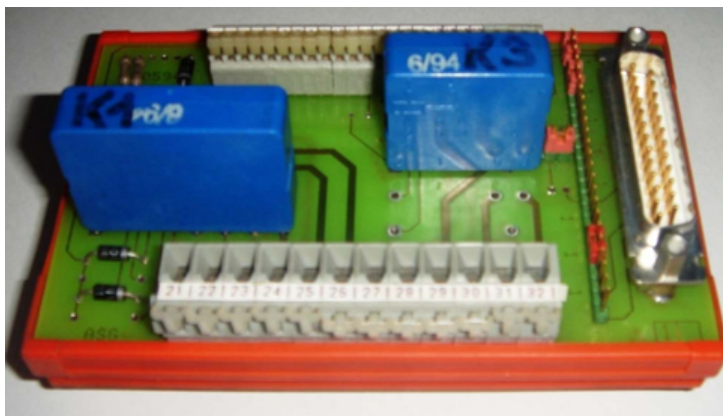
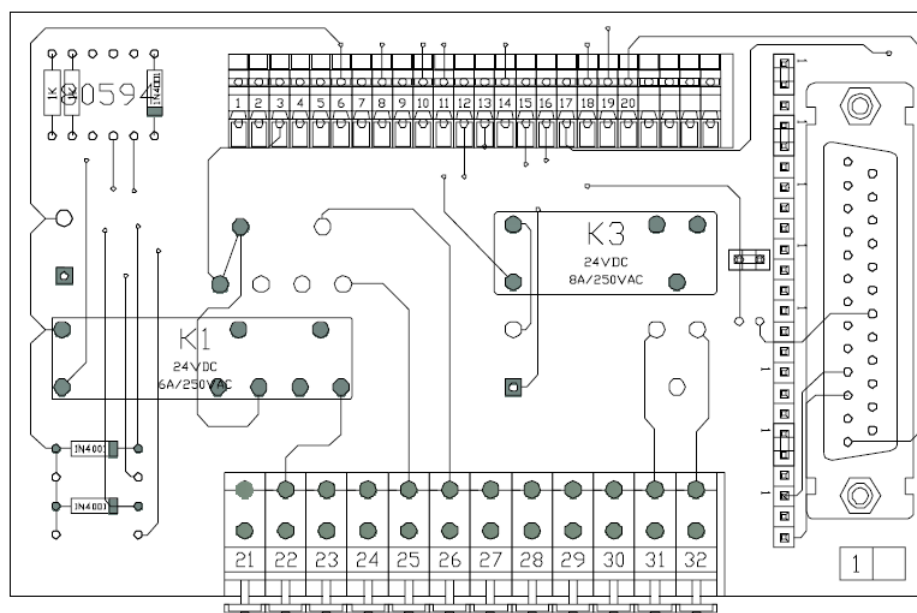


Figura 4.12: Interfaz circuito de potencia

#### Características Técnicas.

- Voltaje de funcionamiento: 24 VDC.
- Voltaje de salida: 24 VDC.
- Número de contactos. K1: 2NO y 2NC. K2: 2NO y 2NC. K3: 1NO y 1NC.
- Conector DB-25.
- Borneras de conexión.



vista anterior

Figura 4.13: Vista anterior tarjeta electrónica de riel

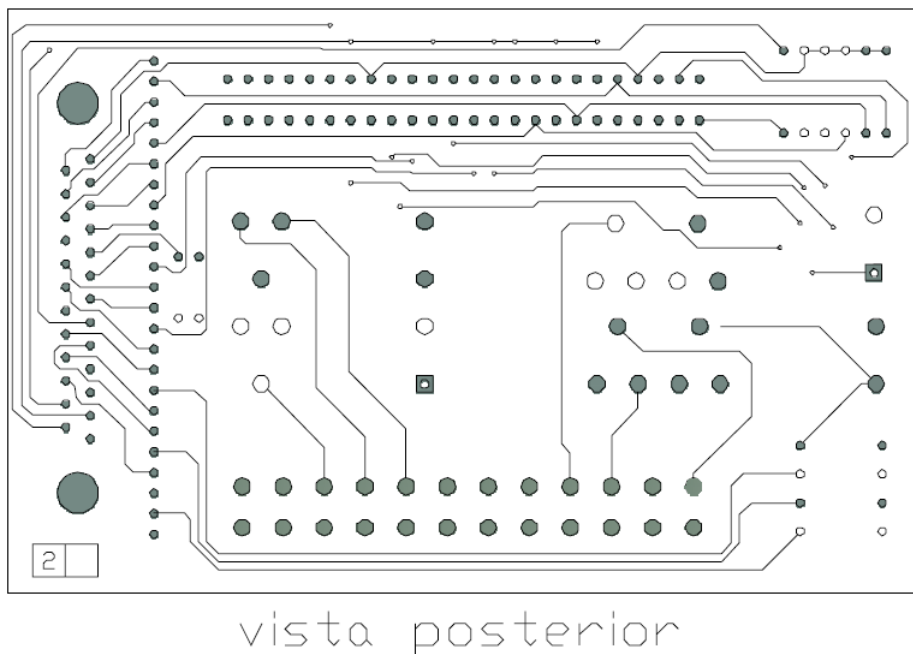


Figura 4.14: Vista posterior tarjeta electrónica de riel

#### 4.4.2. Placa electrónica del piezosensor.

La placa electrónica del piezosensor comprende de un amplificador operacional TL082CP, el cual está configurado como no inversor y seguidor, con una ganancia de salida de 10, permitiendo lecturas más precisas del sensor.

Tabla 4.6: Conexión entre placa del piezosensor y arduino Mega ADK.

Pines J1	Función	Colores de cable
1	+12V	Naranja
2	-12V	Azul
3	GND	Verde
4	SIGNAL	Blanco



Figura 4.15: Alimentación y conexión placa piezosensor

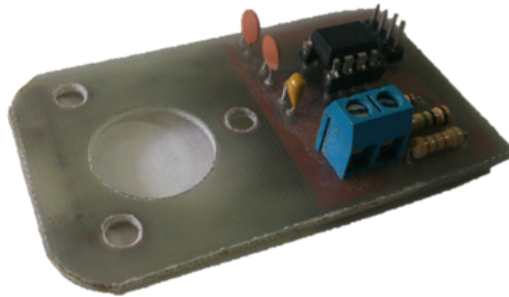


Figura 4.16: Fotografía placa piezosensor

#### Características Técnicas.

- Voltajes de funcionamiento: +12 VDC, -12 VDC, GND.
- Ganancia de 10.
- Voltaje de salida de hasta 12 VDC.
- Pines de conexión.

En los siguientes diagramas se representan físicamente el plano anterior y posterior de la placa electrónica del piezosensor, tal como se muestra en la siguiente figura.

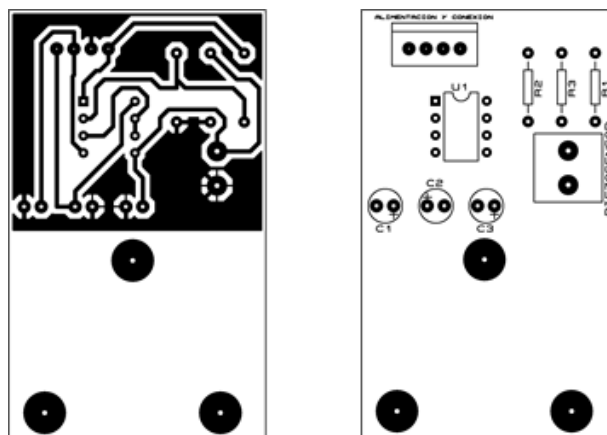


Figura 4.17: Vista posterior y anterior de la placa electrónica del piezosensor

### 4.4.3. Placa electrónica del encoder/fuente 5VDC.

La placa electrónica del encoder/fuente 5VDC está conformada por un conector DB-9, el cual facilita la conexión con el encoder, y un integrado LM7805 polarizado en 12 VDC, el cual nos provee el un voltaje de 5 VDC.

Conexión entre placa electrónica del encoder/fuente 5VDC y Arduino Mega ADK.

Tabla 4.7: Conexión placa encoder

Pines J3	Función	# Pin digital en Arduino	
1	Blanco Encoder (Giro)	2	ENTRADA
2	Verde Encoder (Giro)	3	ENTRADA
3	Tomate Encoder (Referencia)	8	ENTRADA
4	Tierra	Tierra	



Figura 4.18: Conexión placa encoder



Figura 4.19: Fotografía placa electrónica del encoder/fuente 5 VDC.

Características Técnicas.

- Voltajes de funcionamiento: +12 VDC, -12 VDC, GND.
- Conector DB-9.

- Voltaje de salida del encoder de hasta 5VDC.
- Pines de conexión.
- 1 bornera de energización.

En los siguientes diagramas se representan físicamente el plano anterior y posterior de la placa electrónica del encoder/fuente 5 VDC., tal como se muestra en la siguiente figura.

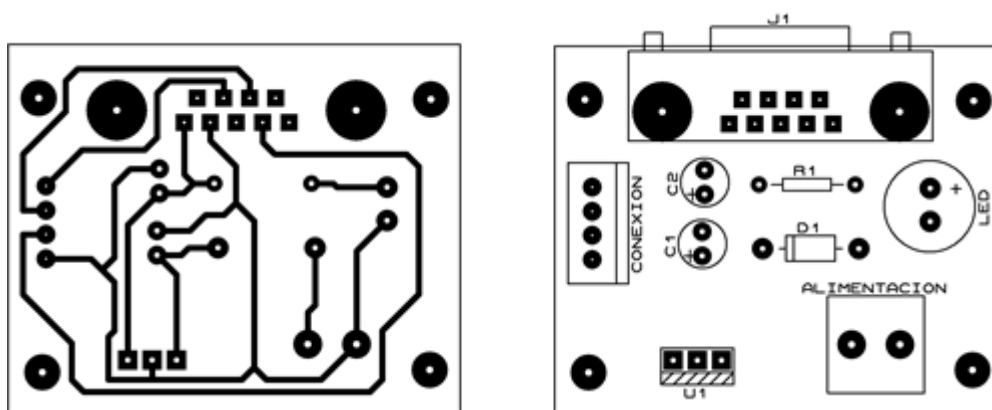


Figura 4.20: Diseño placa encoder

#### 4.4.3.1. Placa electrónica DB-25.

La placa electrónica DB-25 conformada por 6 optoacopladores 4N26, de los cuales 4 optoacopladores reciben señales del tablero de control y los otros optoacopladores restantes controlan la placa electrónica de riel mediante la ayuda de 2 relés de 24 VDC, permitiendo el control entre la potencia de la balanceadora TIRA K-300, mediante un Arduino Mega ADK.

Tabla 4.8: Conexión placa electrónica DB-25 y arduino Mega ADK.

Pines J2	Función	# Pin digital en Arduino	I/O
1	Enabling the start	4	SALIDA
2	Controla K3	5	SALIDA
3	Drive Reading	6	ENTRADA
4	Botón T1	7	ENTRADA
5	Botón T2	9	ENTRADA
6	Drive +24V	10	ENTRADA
7	Tierra	Tierra	

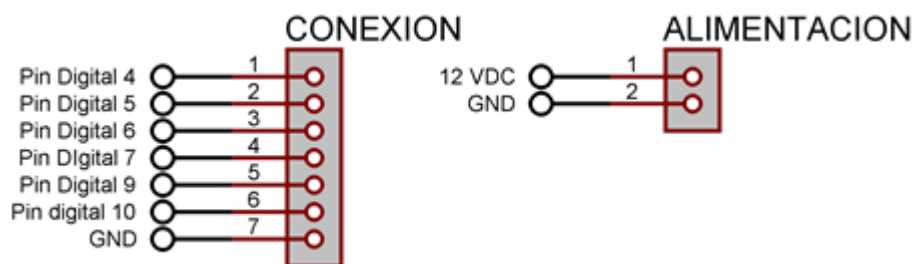


Figura 4.21: Conexión DB-25

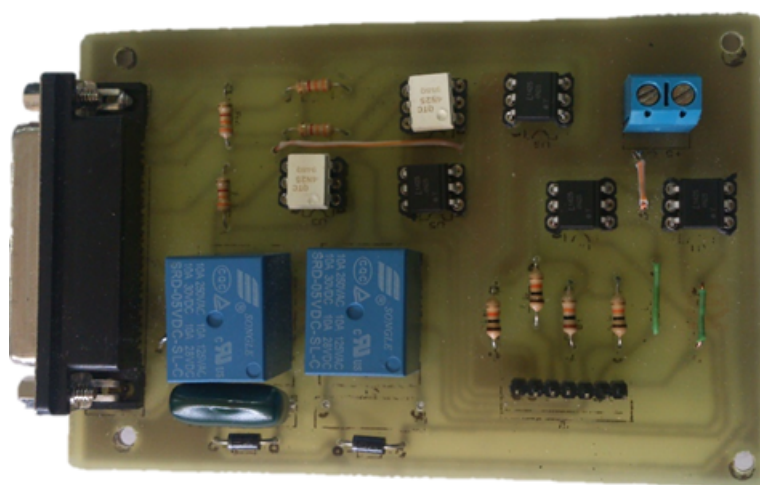


Figura 4.22: Fotografía placa DB25

#### Características Técnicas.

- Conector DB-25.
- 6 Optoacopladores de 5 VDC.
- 2 relés de 5 VDC.
- 2 diodos 1N4148.
- 2 borneras de energización.
- Pines de conexión.

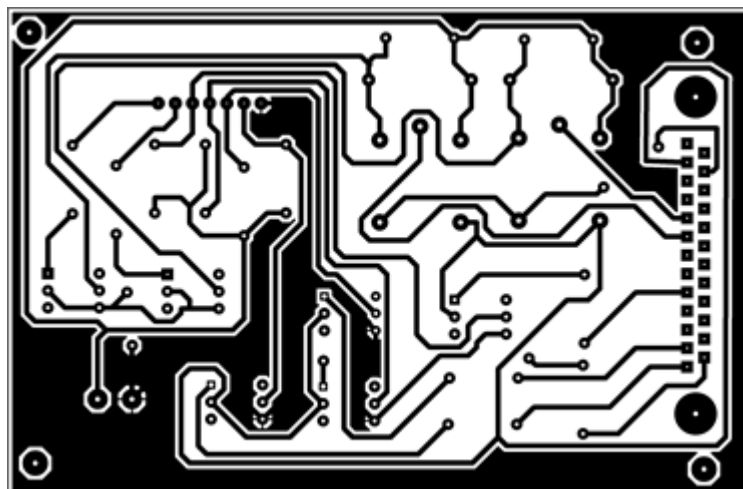


Figura 4.23: Diagrama placa electrónica Db25 inferior

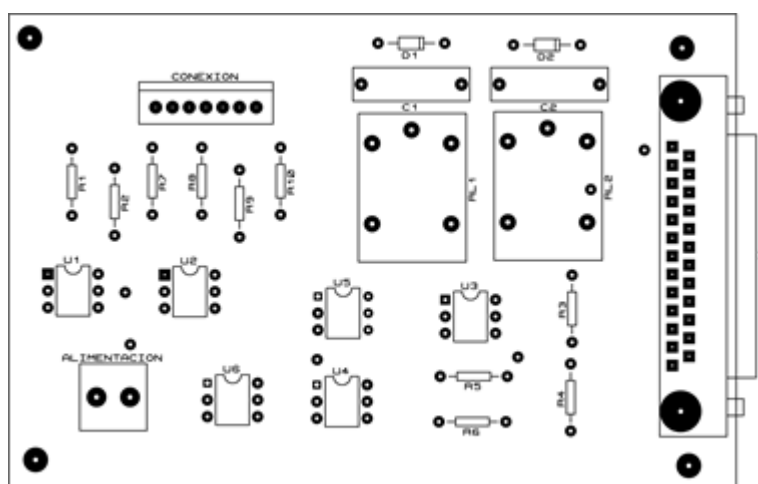


Figura 4.24: Diagrama placa electrónica Db25 superior

#### 4.4.3.2. Placa electrónica de filtro.

La placa electrónica de filtro, permite la conexión de los sensores piezoeléctricos mediante dos DB-9, las señales son filtradas por dos integrados LTC1063 en frecuencia de corte de 12 Hz, esta tiene una relación de 1:100 con la señal de control, la cual oscila a 1200 KHz.

Conexión entre placa electrónica de filtro y Arduino Mega ADK.



Tabla 4.9: Conexión placa filtro

Pines de la placa.	Función.
1	N/A.
2	N/A.
3	N/A.
4	N/A.
5	N/A.
6	N/A.
7	N/A.
8	N/A.
9	N/A.
10	N/A.
11	N/A.
12	-12V
13	+12V
14	TIERRA
15	SALIDA INTEGRADO DERECHA
16	N/A.
17	-12V
18	+12V
19	TIERRA
20	SALIDA INTEGRADO IZQUIERDA

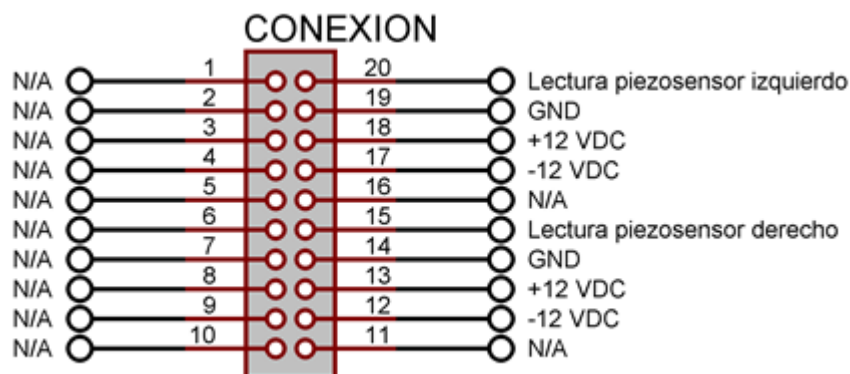


Figura 4.25: Conexión placa filtro

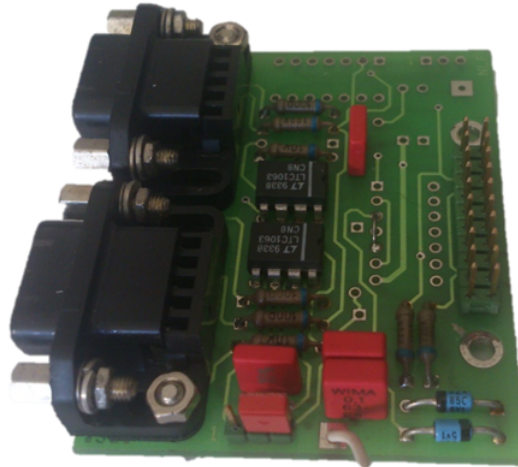


Figura 4.26: Fotografía placa filtro

#### Características Técnicas.

- 2 Conectores DB-25.
- Pines de conexión.
- 2 Integrados LTC1063
- Capacitores VIMA
- Pin para señal de reloj externo, conectado a los 2 integrados LTC1063 para definir su frecuencia de corte
- Energización mediante +12V, -12V y Tierra

## 4.5. Descripción del Hardware libre.

### 4.5.1. Arduino Mega ADK.

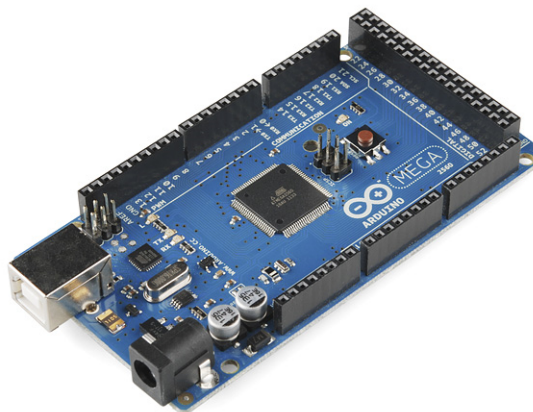


Figura 4.27: Arduino Mega

#### Características

- Microcontrolador: ATmega2560
- Voltaje Operativo: 5V
- Voltaje de Entrada: 7-12V
- Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
- Pines análogos de entrada: 16
- Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA
- Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader)
- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Clock Speed: 16 MHz

## 4.6. Implementación del sistema electrónico de control.

### 4.6.1. Sistema de potencia.

Para la implementación del sistema de potencia se usaron din tracks y un tablero eléctrico. Los elementos se distribuyeron como se muestra a continuación.

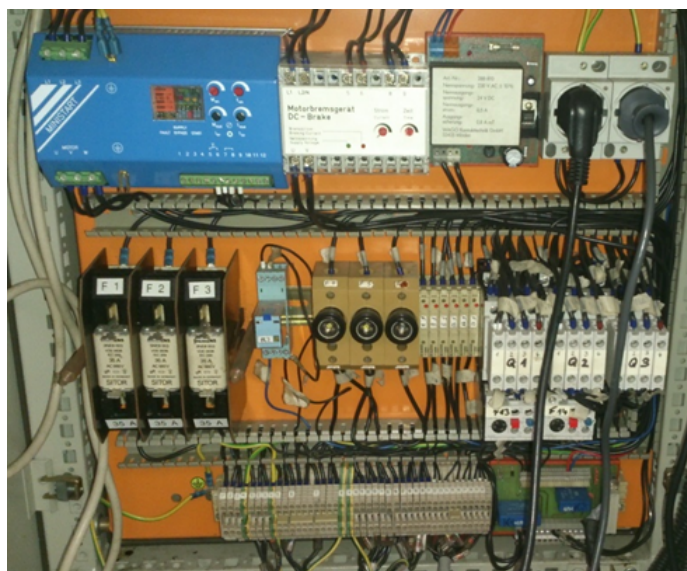


Figura 4.28: Sistema de potencia

### 4.6.2. Sistema de control

Para la contención de todas las tarjetas electrónicas se usó un gabinete eléctrico, con la siguiente distribución.

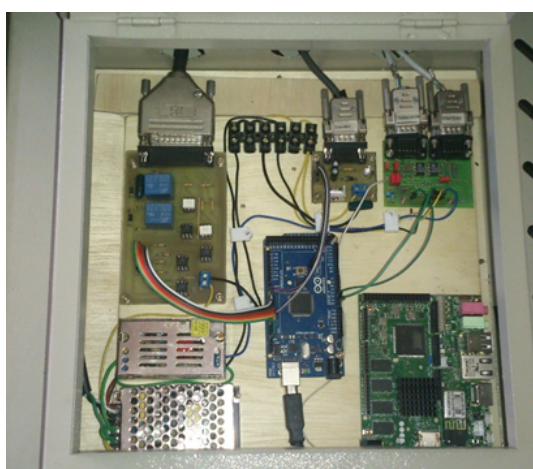


Figura 4.29: Sistema de control

Los gabinetes y tableros eléctricos están normados bajo la norma nema, y están en la clasificación tipo 1, la cual está diseñado para uso de interiores principalmente para proveer un grado de protección contra contactos accidentales y contra cantidades limitadas de polvo y suciedad.

Todos estos sistemas se encuentran incluidos en un armario con norma nema tipo 1.



Figura 4.30: Armario de sistemas eléctricos y electrónicos

Los sensores piezoeléctricos quedaron ubicados como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 4.31: Sensor Piezoeléctrico ubicado

El encoder está situado dentro de la balancadora, como se muestra en la imagen siguiente.

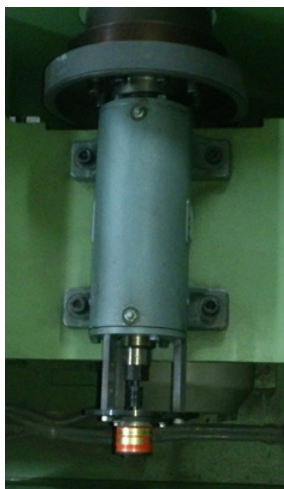


Figura 4.32: Encoder de tres canales

#### **4.7. Esquemas eléctricos y detalle de conexiones.**

Un esquema eléctrico es una representación gráfica de una instalación eléctrica, en la que queda definido cada uno de los componentes de la instalación e interconexión entre ellas. Para una buena comprensión del funcionamiento de la balanceadora TIRA K300 se presentan los siguientes esquemas eléctricos en ANEXO A

## **Capítulo 5**

# **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA**

### **5.1. Generalidades**

Cuando se trata sobre los riesgos mecánicos, el riesgo debe ser eliminado desde el diseño de la misma, en muchas ocasiones esto no es posible, por lo que el riesgo debe ser reducido a un nivel aceptable, o sino el riesgo debe ser aislado, separándolo de los trabajadores, mediante barreras protectoras que permitan que una distancia mínima de seguridad sea respetada.

La siguiente figura muestra la jerarquía de reducción de riesgos

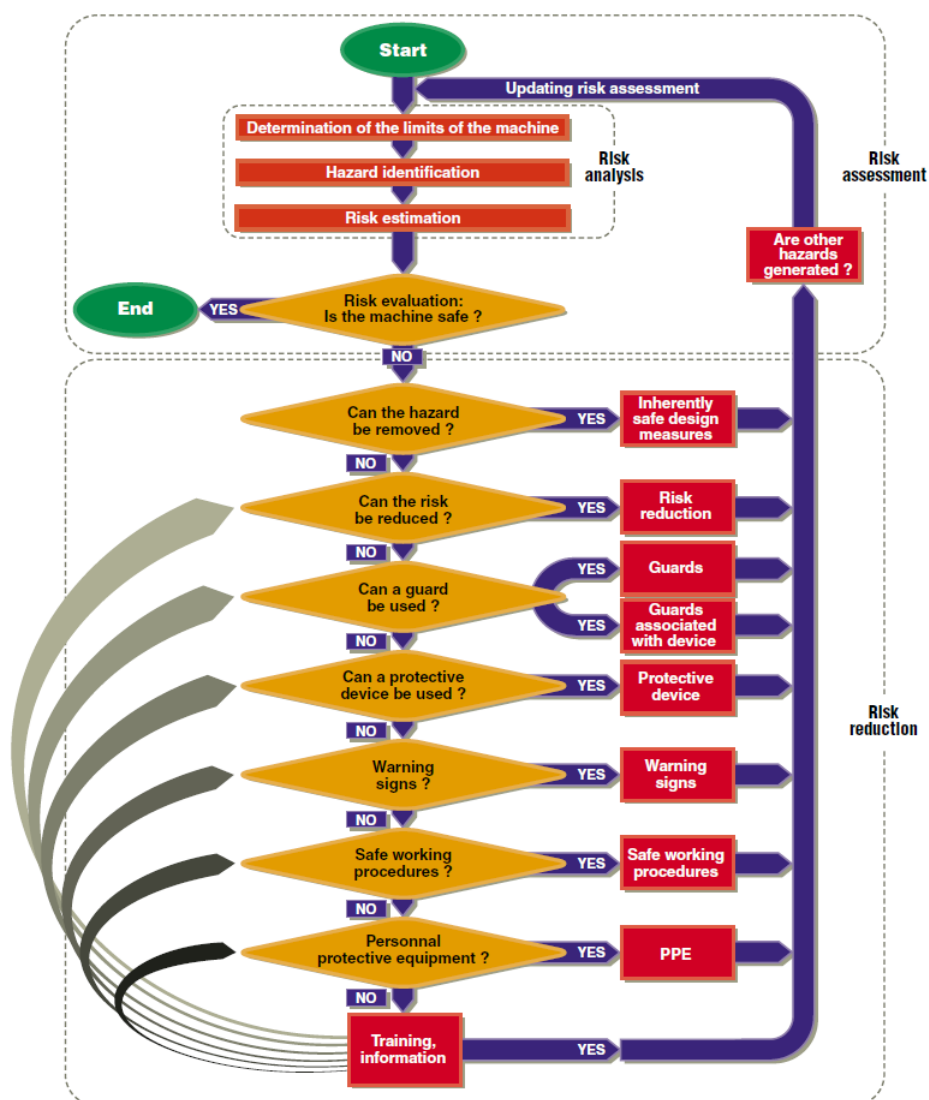


Figura 5.1: Jerarquía de reducción de riesgos  
Fuente: [Laurent Giraud, 2009]

Los factores principales que se deben tener en consideración para las barreras protectoras son:

- Accesibilidad a la zona de peligro de las diferentes partes del cuerpo humano.
- Dimensiones promedio de las partes del cuerpo humano.
- Dimensiones de la zona de peligro y su posición con respecto al suelo o a la plataforma de trabajo.



## 5.2. Análisis del riesgo

- Determinar los límites de la máquina
  - Se determina los límites para la máquina con el supuesto de que se coloque en ella el rotor del diámetro máximo permitido para la máquina.
  - Las personas que usarán la máquina son estudiantes de la universidad, durante un tiempo relativamente corto.
  
- Determinar (Identificar) los peligros
  - Se tiene el peligro de que el operador o una persona que este en el laboratorio, tenga contacto con el rotor cuando este esta girando.
  - Se tiene el peligro de que al colocar el rotor este se caiga, pudiendo impactar en un estudiante.
  - Se tiene el peligro de que la masa de prueba se despegue del rotor e impacte en el usuario.
  
- Estimar los riesgos

Riesgo se define como la combinación entre gravedad del daño y la probabilidad de ocurrencia de este daño. La probabilidad del daño se divide en 3 partes: La frecuencia y la duración de la exposición al peligro, La probabilidad de que el evento peligroso ocurra y la posibilidad de evitar o reducir el daño.

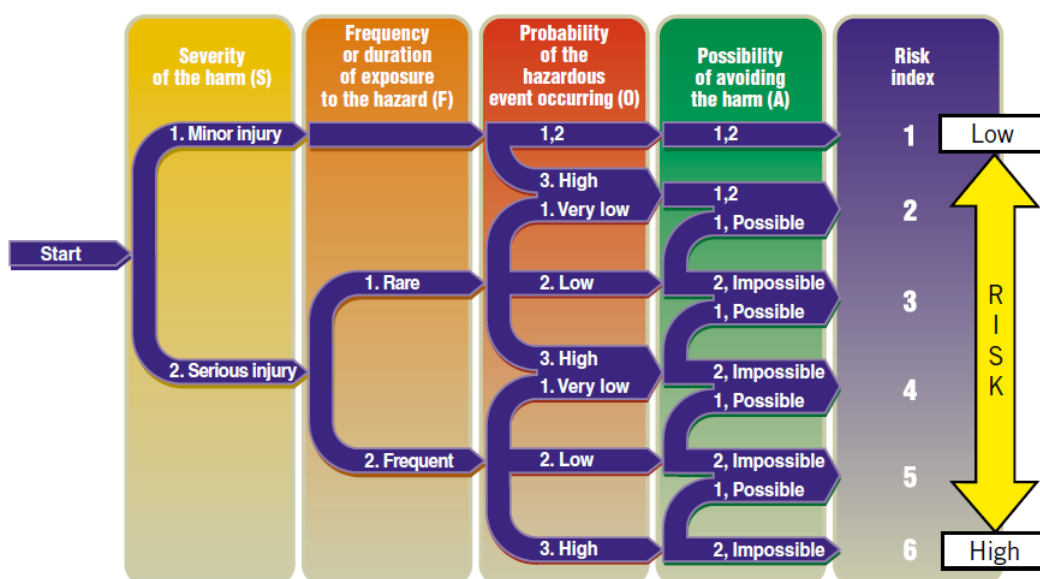


Figura 5.2: Gráfico de riesgos  
Fuente: [Laurent Giraud, 2009]

- Gravedad de la herida ( S )
  - S1 lesión menor.
  - S2 lesión seria.
- Frecuencia de duración de la exposición de los peligros ( F )

Se toma en cuenta aspectos tales como la necesidad de acceso a la zona de peligro, la razón del acceso, el tiempo que se permanece en la zona de riesgo, el numero de personas que deben acceder al sitio.

F1 rara vez , corta exposición.

F2 frecuente a continuo, larga exposición.

- La probabilidad de que el evento peligroso ocurra ( O )

Se estima considerando el historial de accidentes y haciendo una comparación de riesgo con otras máquinas similares.

las opciones son:

01 Muy poco.

02 Poco.

03 Alto.

- Posibilidad de evitar la herida ( A )

Las opciones posibles son:

A1 Posible bajo ciertas condiciones.

A2 Imposible o raramente posible.

Para la máquina se tiene S2, F2, 02, A2, por lo que se tiene un riesgo de 5 en la escala del 1 al 6, el riesgo no se considera tolerable.

### **5.2.1. Reducción del riesgo**

El riesgo que se tiene no puede ser eliminado pues es propio de la máquina, el mismo que debió haber sido eliminado desde el diseño de la misma, las máquinas actuales ya cuentan con una cabina para protección del operador.

#### 1. Barreras fijas

Es una barrera que solo puede ser removida mediante el uso de una herramienta o se coloca en el lugar de forma permanente.

- Barreras envolventes fijas, previene el acceso a la zona de peligro de todas direcciones.

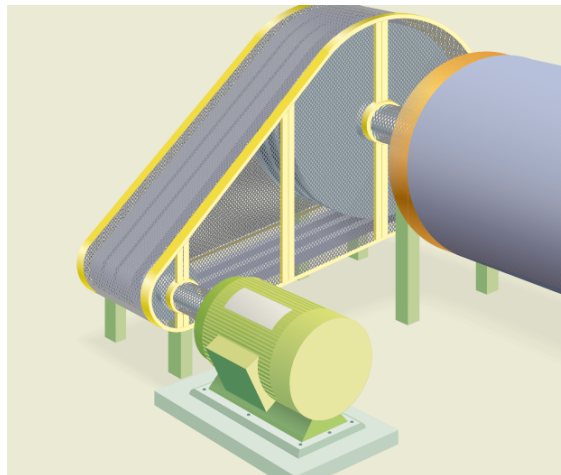


Figura 5.3: Barrera envolvente fija  
Fuente: [Laurent Giraud, 2009]

- Barreras distantes fijas, no encierra completamente la zona de peligro pero previene el acceso a las dimensiones de la zona de peligro.

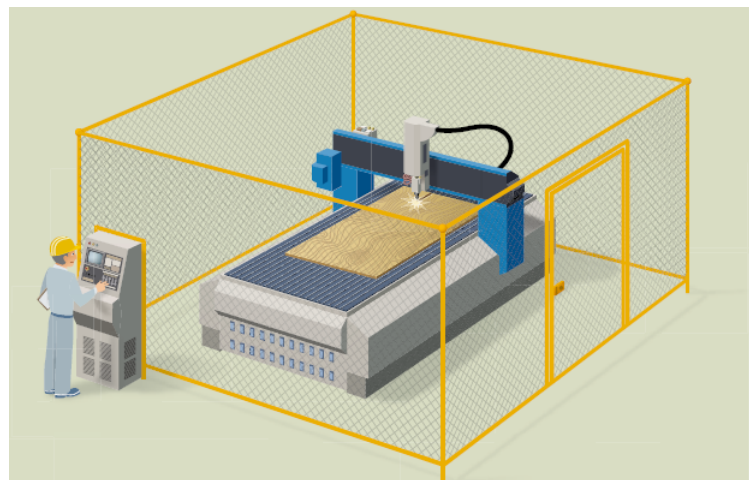


Figura 5.4: Barrera distante fija  
Fuente:[Laurent Giraud, 2009]

- Barreras cortas fijas, se coloca cerca de la zona de movimiento.

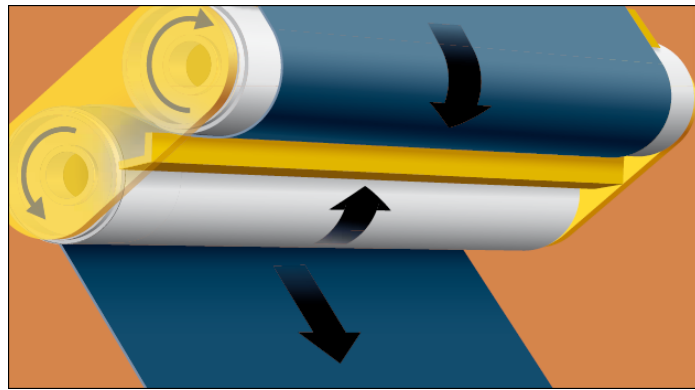


Figura 5.5: Barrera corte fija  
Fuente: [Laurent Giraud, 2009]

## 2. Barreras móviles

- Barrera con enclavamiento
- Barreras móviles operadas
- Cerrado automático

Se elige una barrera móvil operada.

## 5.3. Seguridad

La cubierta móvil, esta conformada por un tubo de acero de 1 pulgada, sobre el cual se asienta una tol perforada.

Esta cubierta descansa su peso sobre 6 rodamientos, 3 a cada lado de la máquina.

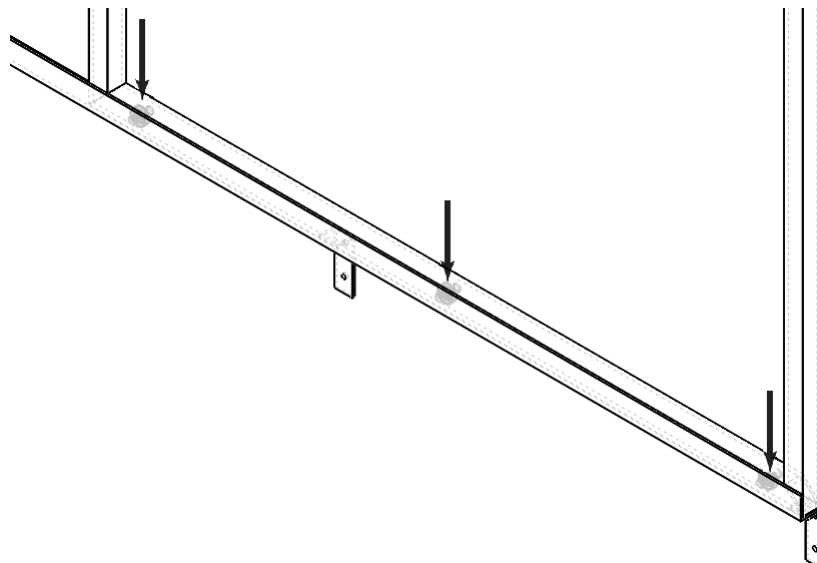


Figura 5.6: Fuerza del peso sobre la riel

La parte móvil corre sobre rieles, las cuales se encuentran sujetas mediante pernos, los pernos están sometidos a una fuerza cortante y a un momento flector.

- Masa del Tol.

$$M_{tol} = V * D \quad (5.1)$$

$$M_{tol} = 3,4 * 1 * 0,0007 * 7850 \quad (5.2)$$

$$M_{tol} = 18,683Kg \quad (5.3)$$

- Masa del Tubo cuadrado.

$$M_{tubo} = V * D \quad (5.4)$$

$$M_{tubo} = (0,0254^2 - 0,0224^2)(10,6)(7850) \quad (5.5)$$

$$M_{tubo} = 11,9323Kg \quad (5.6)$$

- Masa Total.

$$M_{Total} = M_{tol} + M_{tubo} \quad (5.7)$$

$$M_{Total} = 18,683 + 11,9323 \quad (5.8)$$

$$M_{Total} = 30,6153 \quad (5.9)$$

$$W_{Total} = M_{Total} * g \quad (5.10)$$

$$W_{Total} = 30,6153 * 9,8 \quad (5.11)$$

$$W_{Total} = 300,0299[N] \quad (5.12)$$

- Deflexión en la pletina.

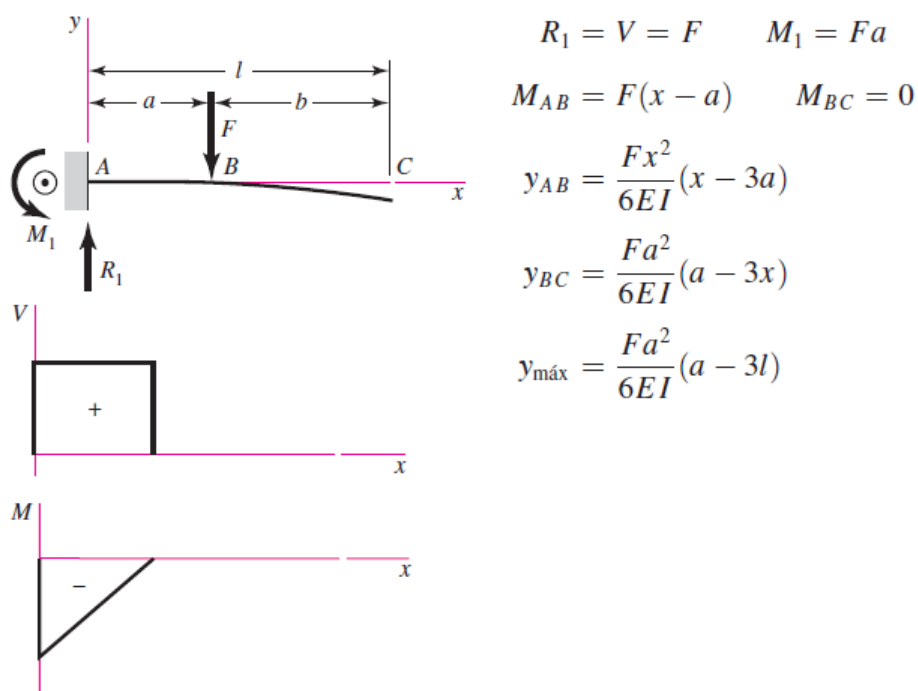


Figura 5.7: Carga Media Voladizo  
Fuente: [y J. Keith Nisbett, 2008]

$$y_{max} = \frac{Fa^2}{6EI}(a - 3l) \quad (5.13)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.14)$$

$$I = \frac{(25,4mm)(3,3mm)^3}{12} \quad (5.15)$$

$$I = 76,0666mm^4 = 76,0666 * 10^{-12} \quad (5.16)$$

$$E = 200000 * 10^6 pa \quad (5.17)$$

$$y_{max} = \frac{Fa^2}{6EI}(a - 3l) \quad (5.18)$$

$$y_{max} = \frac{294(1,28 * 10^{-2})^2}{6(200000 * 10^6)(76,0666 * 10^{-12})}(1,28 * 10^{-2} - 3(2,56 * 10^{-2})) \quad (5.19)$$

$$y_{max} = -3,3773 * 10^{-5} m = -3,3773 * 10^{-2} mm \quad (5.20)$$

- Deflexión en la guía.

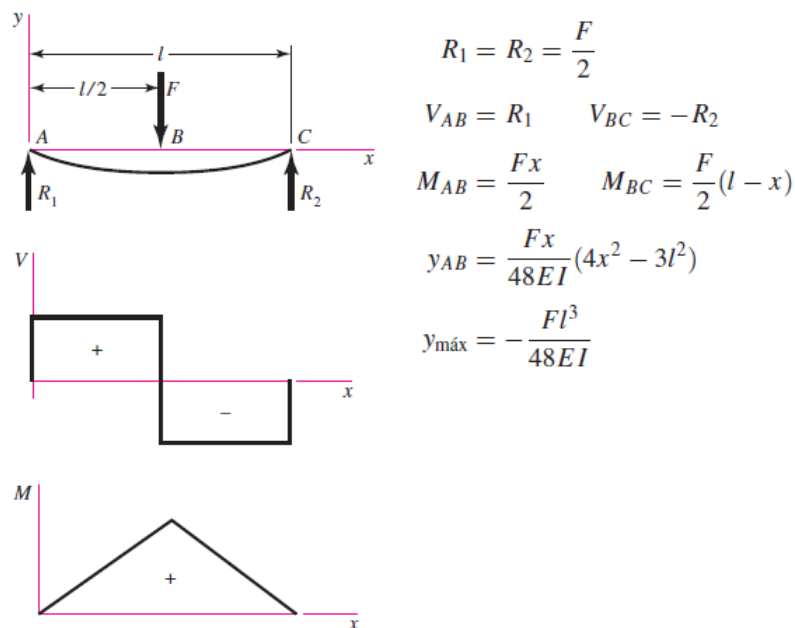


Figura 5.8: Ecuaciones simples carga central

$$y_{max} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (5.21)$$

$$I = \frac{2(0,0033)^3}{12} \quad (5.22)$$

$$I = 1,815 * 10^{-6} m^4 \quad (5.23)$$

$$y_{max} = -\frac{150 * 2^3}{48(200000 * 10^6)(1,815 * 10^{-6})} \quad (5.24)$$

$$y_{max} = -6,887 * 10^{-5} m = -6,887 * 10^{-2} mm \quad (5.25)$$

- Cálculo de resistencia al cortante del tornillo.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (5.26)$$

Donde:

$A_s$  es el área resistente a tracción del tornillo.

$f_{ub}$  es la tensión última a tracción del tornillo.

$\gamma_{Mb}$  es el coeficiente parcial de seguridad.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (5.27)$$

Para el tornillo M6, clase 4.6 se tiene:

$$A_s = \pi r^2 = \pi(0,003)^2 = 2,82744 * 10^{-5} m^2$$

$$f_{ub} = 400 Mpa$$

$$\gamma_{Mb} = 1,25$$

entonces.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (5.28)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * 400 * 10^6 * 2,82744 * 10^{-5}}{1,25} \quad (5.29)$$

$$F_{v,Rd} = 5428,6848 [N] \quad (5.30)$$



## 5.4. Diseño Solidworks

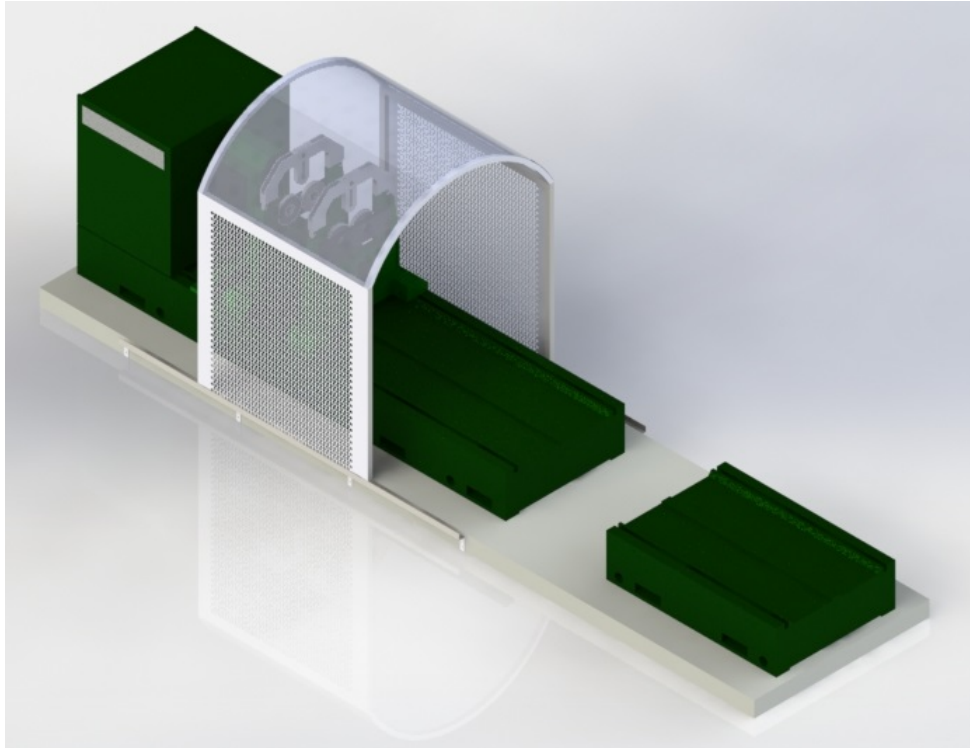


Figura 5.9: Renderizado solidworks

## 5.5. Implementación



Figura 5.10: Estructura implementada



Figura 5.11: Estructura implementada

## Capítulo 6

# DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

### 6.1. Características.

El programa diseñado para la operación de la balanceadora TIRA K300, está estructurado para que esta tenga una interfaz de fácil uso, en la cual la operación y cálculos de balanceo sean visibles en operación, los datos usados pueden ser guardados para la generación de un reporte, en donde se puedan tener todas las características del rotor y resultados de operación, el programa además contiene la norma para balanceo de rotores ISO 1940.

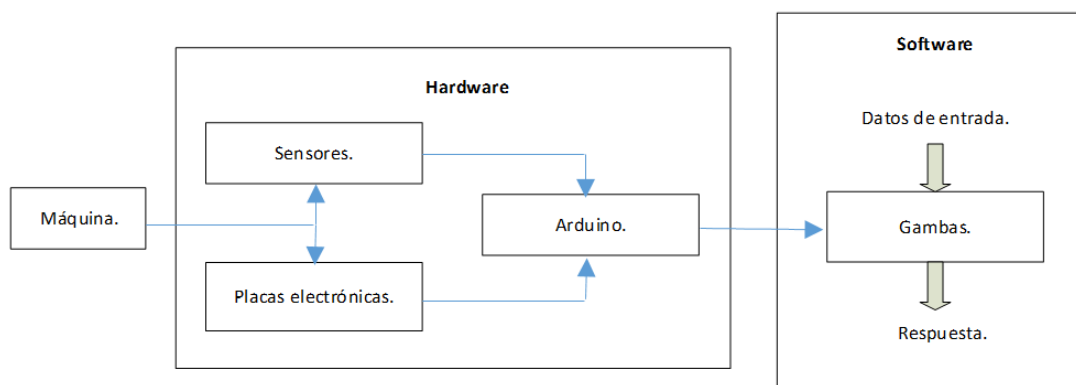


Figura 6.1: Diagrama general.

## 6.2. Software y Hardware.



Figura 6.2: Logo open source

El software de código abierto (en inglés open source software u OSS) es el software cuyo código fuente y otros derechos que normalmente son exclusivos para quienes poseen los derechos de autor, son publicados bajo una licencia de software compatible con la Open Source Definition o forman parte del dominio público. Esto permite a los usuarios utilizar, cambiar, mejorar el software y redistribuirlo,

Se llama hardware libre, electrónica libre o máquinas libres a aquellos dispositivos de hardware cuyas especificaciones y diagramas esquemáticos son de acceso público, ya sea bajo algún tipo de pago, o de forma gratuita. La filosofía del software libre es aplicable a la del hardware libre, y por eso forma parte de la cultura del conocimiento libre.

### 6.2.1. Arduino.



Figura 6.3: Logo arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un micro controlador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El hardware consiste en una placa con un micro controlador Atmel AVR y puertos de entrada/salida.



Figura 6.4: Arduino Mega ADK

El MEGA Arduino ADK es una placa electrónica basada en el Atmega2560. Cuenta con una interfaz de host USB. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas seriales), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio.

#### 6.2.1.1. Entrada de datos.

La interfaz que controla la potencia, envía 4 datos al arduino de manera digital, que son:

Drive Reading: Señal que indica si la máquina está en funcionamiento

Drive +24V: Señal que indica el funcionamiento de la fuente de alimentación DC de 24V.

Botón T1: Señal que indica el pulsamiento del botón T1, que se encuentra en el panel de control.

Botón T2: Señal que indica el pulsamiento del botón T2, que se encuentra en el panel de control.

#### 6.2.1.2. Encoder.

El encoder que posee la máquina es de tres canales, dos para detectar el giro y el sentido, y uno para la referencia del encoder.

La señal que envía el encoder tiene la forma que se indica en la siguiente figura:

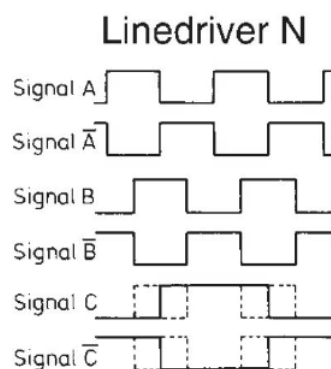


Figura 6.5: Señal encoder de 3 canales

Para su detección en el arduino se usa interrupciones, usando los pines que dispone el Arduino Mega, estos son los pines digitales 2 y 3.

Las interrupciones se programan para que se activen al cambio, cuando la señal pasa de 0 a 1 o de 1 a 0.

Al activarse la interrupción, el arduino sensa el estado del otro canal de giro del encoder, dependiendo si se encuentra el otro canal en alto o bajo se puede detectar el sentido de giro.

### 6.2.1.3. Muestreo de datos.

La frecuencia de muestreo mínima es:

Según el teorema de Nyquist-Shannon

$$f_{adq} \geq 2f_{max}$$

La frecuencia máxima de la máquina se da a las 1750 rpm, que equivalen a 29.17 Hz

entonces:

$$f_{adq} \geq 58,34Hz$$

La frecuencia de muestreo del arduino viene dada por un preescaler de 16 por defecto al usar la función analogRead(), dando una frecuencia de muestreo de:

$$f_{adq} = 1,16KHz$$

Que cumple con la frecuencia necesaria para el muestreo.

#### 6.2.1.4. Frecuencia para filtro Butterworth.

Se debe enviar una onda cuadrada a una determinada frecuencia para definir la frecuencia de corte en el integrado de filtro Butterworth.

Se usa el Timer1 en el arduino, que genera una interrupción cada cierta frecuencia.

Se configura el Timer mediante la librería <TimerOne.h>, y se setea una frecuencia de 1.2 KHz

En el código se programa la frecuencia usando una variable auxiliar denominada ledState que cambia durante cada interrupción y es la encargada de controlar el estado de la salida del arduino.

#### 6.2.1.5. Estadística para datos de la señal.

Se toma una muestra de 30 vueltas, se efectúa el promedio entre ellas para encontrar la media, mediante esto podemos eliminar los valores que no se encuentren en el centro de la campana de Gauss, usando la desviación estándar, luego eliminado estos valores, se calcula el centro de la campana de Gauss de una manera mas precisa.

#### 6.2.1.6. Código Arduino.

Se usan las funciones que vienen predefinidas en el software Arduino.ide:

En el siguiente cuadro se indican las funciones para lectura y escritura de pines del arduino.

Tabla 6.1: Funciones usadas para pines arduino

Función	Descripción
pinMode(Pin ,Input/Output )	Se configura el pin como entrada o salida
digitalWrite(Pin,High/Low )	Se setea el pin en alto o en bajo
digitalRead (Pin)	Se obtiene el estado digital del pin
analogRead(Pin);	Se obtiene el valor analógico del voltaje del pin

Tabla 6.2: Funciones usadas para comunicación serial

Función	Descripción
Serial.begin(baudios);	Se inicializa la comunicación serial
Serial.print(dato);	Se envía un dato
Serial.read();	Se recibe un dato

Tabla 6.3: Funciones varias

Función	Descripción
<code>attachInterrupt(0, doEncoderA, CHANGE)</code>	Se activa la interrupción en el pin, se configura al cambio de estado
<code>millis();</code>	Retorna el valor de tiempo, que se mide mediante el <code>timer0</code> del arduino
<code>abs()</code>	Retorna el valor absoluto de un número

Se usa la librería `TimerOne.h`

Tabla 6.4: Funciones usadas de la librería `Timer1`

Función	Descripción
<code>Timer1.initialize(microseconds);</code>	Configura el periodo
<code>Timer1.attachInterrupt(función);</code>	Activa la interrupción, que se activa cada vez que el periodo de tiempo termina
<code>Timer1.setPeriod(microseconds);</code>	Setea un nuevo periodo luego que la librería fue inicializada

### 6.3. Ubuntu



Figura 6.6: Logo ubuntu

Ubuntu es un sistema operativo basado en GNU/Linux y que se distribuye como software libre, el cual incluye su propio entorno de escritorio denominado Unity. Su nombre proviene de la ética homónima, en la que se habla de la existencia de uno mismo como cooperación de los demás.

La versión estable usada es la de Ubuntu 14.04, la cual fue lanzada el 23 de octubre de 2014.



## 6.4. Gambas



Figura 6.7: Logo Gambas

Gambas es un lenguaje de programación libre derivado de BASIC (de Ahí que quiere decir Gambas Gambas Almost Means Basic). Es distribuido con licencia GNU GPL. Cabe destacar que presenta ciertas similitudes con Java ya que en la ejecución de cualquier aplicación, se requiere un conjunto de librerías intérprete previamente instaladas (Gambas Runtime) que entiendan el bytecode de las aplicaciones desarrolladas y lo conviertan en código ejecutable por el computador.

Permite crear formularios con botones de comandos, cuadros de texto y muchos otros controles y enlazarlos a bases de datos como MySQL, PostgreSQL o SQLite además de facilitar la creación de aplicaciones muy diversas como videojuegos (utilizando OpenGL), aplicaciones para dispositivos móviles, aplicaciones de red (con manejo avanzado de protocolos HTTP, FTP, SMTP, DNS), entre otras

### 6.4.1. Diagrama del flujo del programa

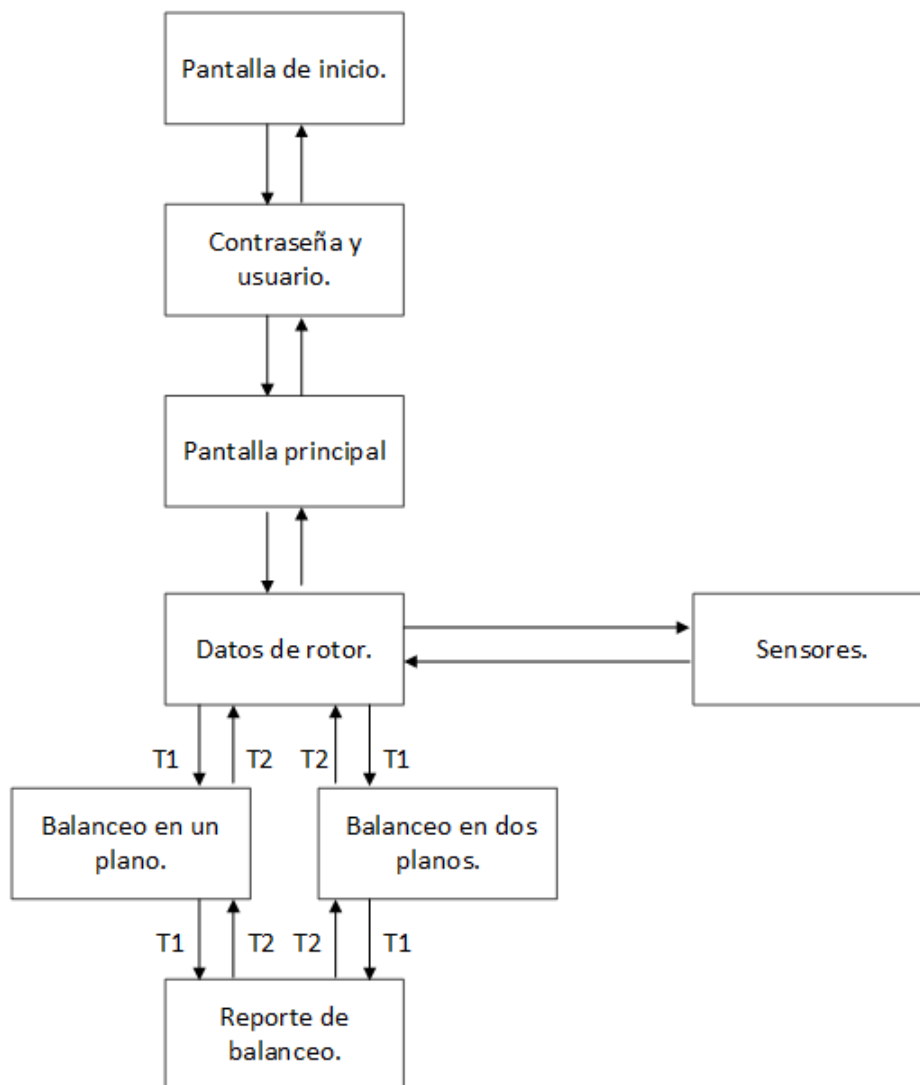


Figura 6.8: Diagrama de flujo software en gambas

- **Pantalla de inicio:**

Se muestra el sello de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE y datos técnicos de la balanceadora

- **Contraseña y usuario:**

En esta pantalla se ingresan el usuario y la contraseña necesarios para poder habilitar el uso de la máquina balanceadora de rotores TIRA K300.

- **Pantalla principal:**

En esta pantalla están presentes todas las demás opciones del programa, en la cual se requiere la opción del tipo de rotor para proseguir con la recolección de datos de la balanceadora, después del proceso de balanceo en esta se encuentra la opción para generar el reporte de balanceo.

- Datos del rotor:

Esta pantalla es opcional, solo es necesaria para crear el reporte de balanceo, en esta pantalla se puede ingresar longitudes, diámetros y masa del rotor, los botones de control <T1> y <T2> sirven para ir o regresar a la siguiente pantalla según sea el caso, T1 para proseguir o T2 para regresar.

- Balanceo en un plano:

Luego de elegir el tipo de rotor, siendo esta elección el balanceo del rotor en un plano esta pantalla se habilita, la conexión con el arduino Mega ADK es necesaria para la adquisición de datos, los botones de control <T1> y <T2> sirven para ir a la opción de generación del reporte, siempre y cuando los datos del rotor hayan sido ingresados, el funcionamiento de los botones son: T1 para proseguir o T2 para regresar.

- Balanceo en dos planos:

Luego de elegir el tipo de rotor, siendo esta elección el balanceo del rotor en dos planos esta pantalla se habilita, la conexión con el arduino Mega ADK es necesaria para la adquisición de datos, los botones de control <T1> y <T2> sirven para ir a la opción de generación del reporte, siempre y cuando los datos del rotor hayan sido ingresados, el funcionamiento de los botones son: T1 para proseguir o T2 para regresar.

## 6.5. Datos editables

### 6.5.1. Datos del rotor

Tabla 6.5: Nomenclatura datos del rotor

Símbolos	Descripción
A	Identifica la distancia entre el plano de apoyo izquierdo y derecho del plano de equilibrado del rotor.
B	Identifica la distancia entre el plano de apoyo izquierdo y derecho del plano de equilibrado del rotor.
C	Identifica la distancia entre la derecha del plano de apoyo y la derecha del plano de equilibrado del rotor.
D1/D2	Identifica el diámetro con el que el desequilibrio se corrige y el funcionamiento de calibración se realiza a la izquierda del plano de D1 / derecha del plano D2.
Masa	Debe ser introducido con una precisión de más de 10%.

La masa de prueba se deberá agregar, en gramos, de esta forma el resultado obtenido estará directamente expresado en gramos.

La posición del rotor (ubicación del peso de prueba respecto de la referencia) es muy importante tener en cuenta que la posición de  $0^\circ$  (referencia) viene dada por el encoder, el corrimiento de la posición respecto del  $0^\circ$  será negativo si coincide con el sentido de giro y positivo si es opuesto al sentido de giro, el ángulo se lo mide en la parte superior del rotor como se indica en la siguiente figura

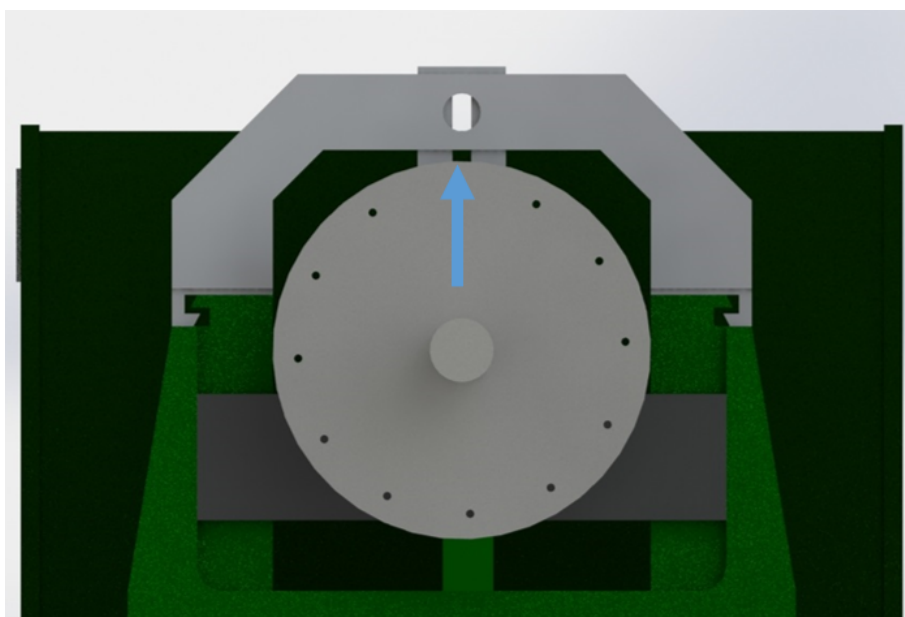


Figura 6.9: Lugar de medición

### 6.5.2. Datos de tolerancia.

Para saber si el balanceo está dentro de las especificaciones de la norma ISO 1940, se deben ingresar:

TIPO DE ROTOR. Esta se debe escoger según el tipo de clasificación, en la cual el rotor se encuentra.

Tabla 6.6: Datos de tolerancia

	Descripción.
Norma ISO 1940.	En esta sección de la pantalla, se debe escoger el tipo de rotor según la norma, bajo esta se encuentra una breve descripción de la opción escogida
Velocidad de trabajo.	Es la velocidad en la cual trabaja el rotor, las unidades deben ingresarse en rev/min.
Radio.	Es el radio existente entre la masa de prueba y su distancia al centro del rotor.
Grado de desbalanceo.	Es el valor máximo admisible de desbalance según la norma ISO 1940, este está dado en [g mm].

Para verificar que el grado de balanceo está dentro de lo permitido, el grado de desbalanceo actual debe ser menor al del desbalanceo permitido, en la pantalla se puede desplegar el gráfico de g.mm vs rpm de la norma para un mayor análisis.

### 6.5.3. Generación de reporte.

La opción de generación de reporte crea un archivo en PDF, en el cual se encuentran los resultados obtenidos en todo el proceso de balanceo de rotores.

## 6.6. Diseño de interfaz

Para el diseño de la interfaz se usó la guía GEDIS.

Uso de colores.

Para el fondo de pantalla se usó el color gris plata con la siguiente descripción:

Tabla 6.7: Color interfaz fondo pantalla

Color	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Gris	160/0/224	238/238/238

Para la visualización de las señales se usaron los colores negro y verde, los cuales tienen la descripción siguiente:

Tabla 6.8: Colores interfaz señales

Color	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Negro	80/240/53	0/113/0
Verde Oscuro	160/0/224	238/238/238

Para los botones se usó el color naranja claro con le descripción:

Tabla 6.9: Colores botones

Color	Matiz/Sat/Lum	Rojo/Verde/Azul
Naranja claro	255/175/95	30/160/255

## 6.7. Diseño de salida

En el inicio del diseño de la interfaz se empieza determinando la salida de información que es el objetivo para el cual el programa es creado, definiendo que datos deben ser almacenados y que datos deben ser entregados al usuario. La forma de salida tradicional es en papel en forma de informes impresos y archivos formato pdf, y la forma de salida transitoria como las pantallas, las salidas de video y audio.

Para el proceso de balanceo, la salida debe ser la masa y ángulo de corrección para el balanceo, en uno o dos planos para su consecuente corrección añadiendo o removiendo masa.

### 6.7.1. Diseñar la salida para ajustarla al usuario

El sistema de la máquina balanceadora está dirigida a usuarios que tienen conocimiento de mecánica y de vibraciones.

Se ha diseñado la interfaz para que sea lo mas amigable y simple posible.

### 6.7.2. Entregar la cantidad apropiada de salida

Una parte importante en la tarea de diseñar es decidir que cantidad de datos de salida es la correcta para los usuarios. Un criterio útil es que el sistema debe proveer la información necesaria al usuario para que pueda realizar su trabajo en el caso de la máquina que pueda realizar el balanceo.

No se quiere que exista una sobrecarga de información al usuario sino que se muestre un subconjunto de la información al usuario, conforme avance el proceso de balanceo.

Los usuarios no necesitan toda la información, sino que debe ser posible acceder a ella mediante estructuras jerárquicas.

### 6.7.3. Proveer la salida en forma oportuna

El problema es que los usuarios muchas veces no reciben la información necesaria para la toma de decisiones. Por lo que la sincronización desempeña un papel importante en cuanto a que tan útil será la salida.

En el programa se presentará información de ayuda para el proceso de balanceo, para que sea lo más didáctico posible.

### 6.7.4. Elección del método de salida

Para producir diferentes tipos de salida se necesitan distintas tecnologías. Por ejemplo salida impresa se necesita una impresora. La salida de audio, necesitan un parlante. La salida via Web necesita conexión a Internet.

Método de salida	Ventajas	Desventajas
Impresora	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asequible para la mayoría de las organizaciones</li> <li>• Flexible en cuanto a tipos de salida, ubicación y capacidades</li> <li>• Maneja grandes volúmenes de salida</li> <li>• Altamente confiable, con poco tiempo de inactividad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aún se requiere de intervención por parte del operador.</li> <li>• Problemas de compatibilidad con el software de computadora</li> <li>• Puede requerir provisiones especiales y costosas</li> <li>• Puede ser lenta, dependiendo del modelo</li> <li>• Poco amigable para el ambiente</li> </ul>
Pantalla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interactiva</li> <li>• Transmisión en línea y tiempo real</li> <li>• Silenciosa</li> <li>• Aprovecha las capacidades de la computadora para desplazarse por las bases de datos y los archivos</li> <li>• Buena para los mensajes efímeros con acceso frecuente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede requerir cables y espacio para su instalación</li> <li>• De todas formas se puede requerir documentación impresa</li> </ul>
Salida de audio y podcasts	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena para usuarios individuales</li> <li>• Buena para mensajes transientes</li> <li>• Buena en donde el trabajador necesita las manos libres</li> <li>• Buena si hay que distribuir la salida en áreas muy amplias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requieren audífonos cuando la salida no debe interferir con otras tareas</li> <li>• Tiene una aplicación limitada</li> </ul>
DVC, CD-ROM y CD-RW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene gran capacidad</li> <li>• Permite salida multimedia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere una computadora y una pantalla para leer los datos</li> </ul>
Salida electrónica (email, sitios Web, blogs y fuentes RSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce el papel</li> <li>• Se puede actualizar con mucha facilidad</li> <li>• Se puede "transmitir"</li> <li>• Se puede hacer interactiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No contribuye al formato (email)</li> <li>• Es difícil transmitir el contexto de los mensajes (email)</li> <li>• Los sitios Web requieren de un mantenimiento diligente</li> </ul>

Figura 6.10: Comparación métodos de salida

Fuente: [y Kendall, 2011]

Se elige un método de salida mediante pantalla en la cual se visualizarán los datos del balanceo, y un archivo pdf el cual contendrá un reporte del balanceo de la máquina.

## 6.8. Diseño de entrada

Para tener una salida de calidad, en buena medida depende de la calidad de entrada.

Los métodos de entrada, mediante ingreso de texto y los interactivos deben cumplir con objetivos tales como efectividad, precisión, facilidad de uso, simpleza y atracción.

La efectividad significa que los datos ingresados sean usados para propósitos específicos, en el caso de el software es que pidamos al usuario estrictamente los datos necesarios para el balanceo.

La precisión consiste en la certeza que el diseño proporciona para el llenado adecuado, en el caso del software es que el usuario pueda ingresar solo los valores adecuados, mediante la validación de datos.

La facilidad de uso significa que los métodos de entrada sea simples, de manera que el usuario requiera el menor tiempo posible para descifrar su estructura, en el caso del software, se hace mediante ayudas y con métodos interactivos.

La simpleza se refiere a mantener un diseño ordenado de manera que el usuario enfoque su atención solo en lo estrictamente necesario, en el software se lo hace dando la información al usuario que necesita y ocultando la que es innecesario

La atracción significa que tenga un diseño agradable, incluyendo los colores, tamaño de letra.

### **6.8.1. Mantener la pantalla simple**

Se recomienda según [y Kendall, 2011] que para mantener la pantalla simple , al menos el 50 % del área de la pantalla debe contener información útil. Esto es lo que se ha hecho en el caso de la presente interfaz.

#### **6.8.1.1. Tres secciones de la pantalla**

La salida de la pantalla se divide en 2 secciones

La parte superior que contiene el encabezado que contiene el título del software y las distintas ventanas a la cual el usuario puede ingresar.

La sección media e inferior se denomina el “cuerpo” de la pantalla, se usa para introducir datos, se organiza de izquierda a derecha y de arriba a abajo. La ayuda se la presenta en esta parte, también se encuentran los botones para adquirir los datos, realizar cálculos entre otras funciones.

### **6.8.2. Mantener la pantalla consistente**

Para el buen diseño de la pantalla, se puede mantener la consistencia si se ubica la información en la misma área cada vez que se acceda a una nueva pantalla, la información del balanceo se encuentra en la parte izquierda y los botones de comandos en la parte derecha.

Se agrupan los datos del desbalance en la parte derecha inferior.



### **6.8.3. Facilitar el movimiento**

Según [y Kendall, 2011] para facilitar el movimiento entre ventanas, se debe cumplir la regla de los “tres clics”, que establece que los usuarios deben ser capaces de llegar a otra ventana que necesitan en tres clics de ratón o de teclado como máximo.

Esto se cumple en el software, también se facilita el movimiento mediante los botones T1 y T2 que son parte del panel de control y que permiten el cambio hacia la derecha y hacia la izquierda en las ventanas.

### **6.8.4. Diseñar una pantalla atractiva y agradable**

Al ser una pantalla atractiva, puede mantener la atención del usuario, para lograr esto se utilizan muchas áreas en blanco que rodean a los campos de entrada de datos, de esta forma la pantalla adquiere una apariencia ordenada.

Es recomendable usar varias ventanas en lugar de una sola que muy llena con información.

### **6.8.5. Utilice iconos en el diseño de las pantallas**

Los iconos son representaciones visuales que se muestran en pantalla que simbolizan las acciones de computadora que los usuarios pueden seleccionar mediante el uso de ratón.

En el software se usan los iconos para identificar el balanceo en un plano o dos planos, y seleccionar el mismo, según la configuración del rotor.

Estos iconos reemplazan a las palabras y su significado se comprende con mayor rapidez.

## **6.9. Descripción y funcionamiento de la Interfaz.**

### **6.9.1. Conexión entre arduino e interfaz desarrollada en gambas**

Para la adquisición de datos, se usa el arduino, este dispositivo adquiere los datos de los piezosensores y el encoder, el total de datos se detallan a continuación:

Tabla 6.10: Datos comunicación

# Datos	Información	Descripción
2	Amplitud señal de los dos canales	Magnitud que se da en millis
2	Desfase en grados de los dos canales	Desfase con respecto al canal de referencia del encoder
1	Posición	Dada en grados
1	Velocidad de giro	Dada en rpm

Estos datos son enviados como cadena de caracteres vía serial desde el arduino al gambas.

En el software Gambas 3 se usaron los siguientes componentes:

Tabla 6.11: Componentes en gambas

Componente	Descripción
gb	Clases nativas internas.
gb.data	Más contenedores de datos.
gb.form	Más contenedores de datos.
gb.gsl	Librería científica GNU.
gb.gui	Intercambiador de componentes QT/GTK+
gb.image	Manejo de imágenes.
gb.mime	Gestión del formato MIME basado en la librería Gmime
gb.net	Programación de red.
gb.report	Diseñador de reportes.

### 6.9.2. Código de lectura del puerto COM del arduino

Para la detección y conexión del puerto de comunicación serial del arduino se tienen los siguientes módulos:

ConfiguracionPuertoSerie.module:

```

▼ ' Gambas module file

' CREA UNA VARIABLE QUE ALMACENE LA CONFIGURACION DE LA CONEXION SERIAL
Public AppSettings As New Settings

▼ Public Sub InitDefaultPath()
' RUTINA QUE CREA UNA NUEVA CONFIGURACION DEL PUERTO SERIAL
  AppSettings = New Settings
' FIN RUTINA QUE CREA UNA NUEVA CONFIGURACION DEL PUERTO SERIAL
End

▼ Public Sub StoreSerialSettings(Port As SerialPort, PIndex As Integer)
' RUTINA PARA ALMACENAR LOS PARAMETROS DE CONEXION DEL PUERTO SERIAL
  Dim Headline As String
  HeadLine = "SerialPort " & Format(PIndex, "0")
  ' Store all parameters
  With Port
    AppSettings[HeadLine & "/Portname"] = .PortName
    AppSettings[HeadLine & "/Speed"] = .Speed
    AppSettings[HeadLine & "/DataBits"] = .DataBits
    AppSettings[HeadLine & "/Stopbits"] = .StopBits
    AppSettings[HeadLine & "/Parity"] = .Parity
    AppSettings[HeadLine & "/FlowControl"] = .FlowControl
  End With
' FIN RUTINA PARA ALMACENAR LOS PARAMETROS DE CONEXION DEL PUERTO SERIAL
End

```

Figura 6.11: ConfiguraciónPuertoSerie.module1

```

▼ Public Sub RestoreSerialSettings(Port As SerialPort, Pindex As Integer)
' RUTINA PARA RESTAURAR LOS PARAMETROS ORIGINALES DE LA CONEXION SERIAL
  Dim i As Integer
  Dim HeadLine As String

  HeadLine = "SerialPort " & Format(PIndex, "0")

  With Port
    .PortName = AppSettings[HeadLine & "/Portname", "/dev/ttyS0"]
    .Speed = AppSettings[HeadLine & "/Speed", "9600"]
    .DataBits = AppSettings[HeadLine & "/DataBits", "8"]
    .StopBits = AppSettings[HeadLine & "/StopBits", "1"]
    .Parity = AppSettings[HeadLine & "/Parity", 0]
    .FlowControl = AppSettings[HeadLine & "/FlowControl", 0]
  End With
  i = FMain.cmbpuerto.Find(FMain.SerialPort1.PortName)
  FMain.cmbpuerto.index = i
' FIN RUTINA PARA RESTAURAR LOS PARAMETROS ORIGINALES DE LA CONEXION SERIAL
End

```

Figura 6.12: ConfiguraciónPuertoSerie.module2

Módulo AgregarPuertos.module

```

▼ Public Sub BuscarPuertosDisponibles () ··
    Dim i As Integer
    With FMain·
        'Parametros
        .SerialPort1.Speed = "9600"
        .SerialPort1.Parity = 0
        .SerialPort1.DataBits = "8"
        .SerialPort1.StopBits = "1"
        .SerialPort1.FlowControl = 0
        'Vaciar el combobox cmbpuerto
        FMain.cmbpuerto.Clear()
        'Arduino ports
        For i = 0 To 8
            .SerialPort1.PortName = "/dev/ttyACM" & Format(i, "0")
            Try .SerialPort1.Open
                If Not Error·
                    .cmbpuerto.Add(.SerialPort1.PortName)·
                    .SerialPort1.close
                Endif
            Next
        End With
    End

```

Figura 6.13: Módulo AgregarPuertos.module

### 6.9.3. Código de escritura

Para la escritura del programa en gambas al arduino se realizó el código a continuación, el cual se encuentra en el evento Click() del togglebutton1, el cual habilita o deshabilita el encendido de la motor, para esto se escribe envía por vía serial el valor "1" o "2" para la habilitación o deshabilitación del encendido del motor.

```

▼ Public Sub ToggleButton1_Click()
  Dim StrBuffeOut As String
  'Para habilitar el motor se envía 1, para deshabilitar el motor se envía 2
  If ToggleButton1.Value = True Then
    'Botón en habilitación de encendido del motor
    StrBuffeOut = 1
    Write #SerialPort2, StrBuffeOut, Len(StrBuffeOut)
    'Envío del "1" via serial al arduino
    StrBuffeOut = ""
    Print "ToggleButton1 ", ToggleButton1.Value
    FMain.ToggleButton1.Text = "Deshabilitar"
  Endif
  If ToggleButton1.Value = False Then
    'Botón en deshabilitación de encendido del motor
    StrBuffeOut = 2
    Write #SerialPort2, StrBuffeOut, Len(StrBuffeOut)
    'Envío del "2" via serial al arduino
    StrBuffeOut = ""
    Print "ToggleButton1 ", ToggleButton1.Value
    FMain.ToggleButton1.Text = "Habilitar"
  Endif
End

```

Figura 6.14: Código de escritura de datos

#### 6.9.4. Código de lectura de arreglo de datos

Para la lectura del arreglo recibido del arduino en el gambas, se realizó el siguiente código, en el cual separamos los caracteres del arreglo, para esto se tiene un valor F y X en cada dato enviado, estos se encuentran al inicio y final del dato respectivamente, el código se muestra a continuación:

```

▼ Public Sub SerialPort2_Read()
    Read #SerialPort2, caracter, 1 'Lof(SerialPort1)
    'Separacion de datos de la cadena de caracteres
    If caracter <> "F" Then
        cadena &= caracter
    Else
        'Separacion de datos cada F de inicio
        dato = Split(cadena, "X")
        'Separacion de datos cada X de fin
        If dato[0] = "POSICION" Then
            Try numero = (dato[1])
            Try TextBox26.Text = (dato[1])
        Endif
        If dato[0] = "T1" Then
            tabulador.Index = 0
        Endif
        If dato[0] = "T2" Then
            tabulador.Index = 1
        Endif
        If dato[0] = "rpm" Then
            Try TextBox21.Text = (dato[1])
        Endif
        If dato[0] = "Amplitud" Then
            Try TextBox22.Text = (dato[1])
            Try Amplitud1sensor = TextBox22.Text
            Print Amplitud1sensor
        Endif
        If dato[0] = "Angulo" Then
            Try TextBox23.Text = (dato[1])
            Try Angulo1sensor = TextBox23.Text
            Print Angulo1sensor
        Endif
        If dato[0] = "Amplitud1" Then
            Try TextBox24.Text = (dato[1])
            Try Amplitud2sensor = TextBox24.Text
            Print Amplitud2sensor
        Endif
        If dato[0] = "Angulo1" Then
            Try TextBox25.Text = (dato[1])
            Try Angulo2sensor = TextBox25.Text
            Print Angulo2sensor
        Endif
    Endif
End

```

Figura 6.15: Código de lectura de arreglo de datos

### 6.9.5. Pantalla de inicio

Al iniciarse el programa se mostrara la siguiente ventana, en donde se muestran algunas características de la maquina balanceadora de rotores TIRA K300, esta ventana estará presente 5 segundos.



Figura 6.16: Pantalla de inicio

### 6.9.6. Contraseña y usuario

Después aparecerá otra pantalla, en la cual se deberán ingresar los datos de usuario y contraseña correctos para poder entrar a la pantalla principal del programa, la pantalla se muestra a continuación.



Figura 6.17: Pantalla de ingreso

### 6.9.7. Pantalla principal

Una vez ingresados los datos correctos, el programa habilitará la pantalla principal, mostrada a continuación.

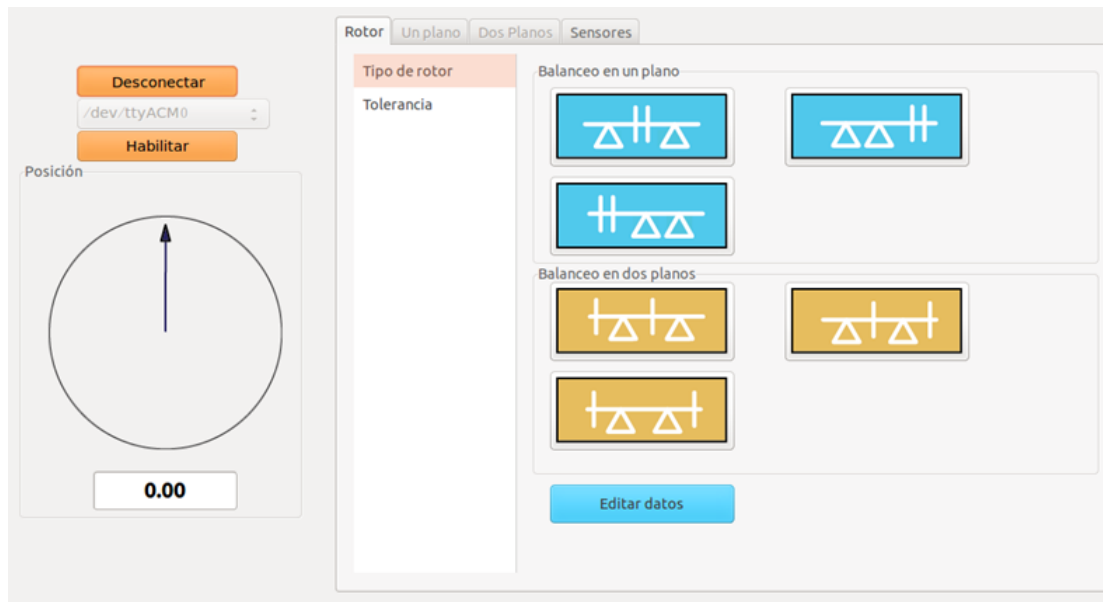


Figura 6.18: Pantalla principal

#### 6.9.7.1. Procedimiento para realizar la comunicación con la máquina.

1. Al iniciar el programa, se debe presionar el botón “Actualizar”, esto es necesario para que los puertos de comunicación se actualicen, y poder detectarlos.
2. Una vez actualizada la lectura de los puertos, deberá aparecer la opción “/dev/tty/ACM0”, con el puerto detectado procedemos con la conexión, pulsando el botón “Conectar”
3. Para la habilitación de la máquina, se debe presionar el botón de estado “Habilitar”, este también puede deshabilitar la máquina, al pulsar el botón en el estado “Deshabilitar”.

#### 6.9.7.2. Selección del tipo de rotor

Es necesario ingresar el “Tipo de rotor”, se elige el tipo de rotor que se encuentra en la parte derecha de la pantalla, el cual habilita la opción de balanceo en un plano o dos planos, dependiendo de la opción escogida.



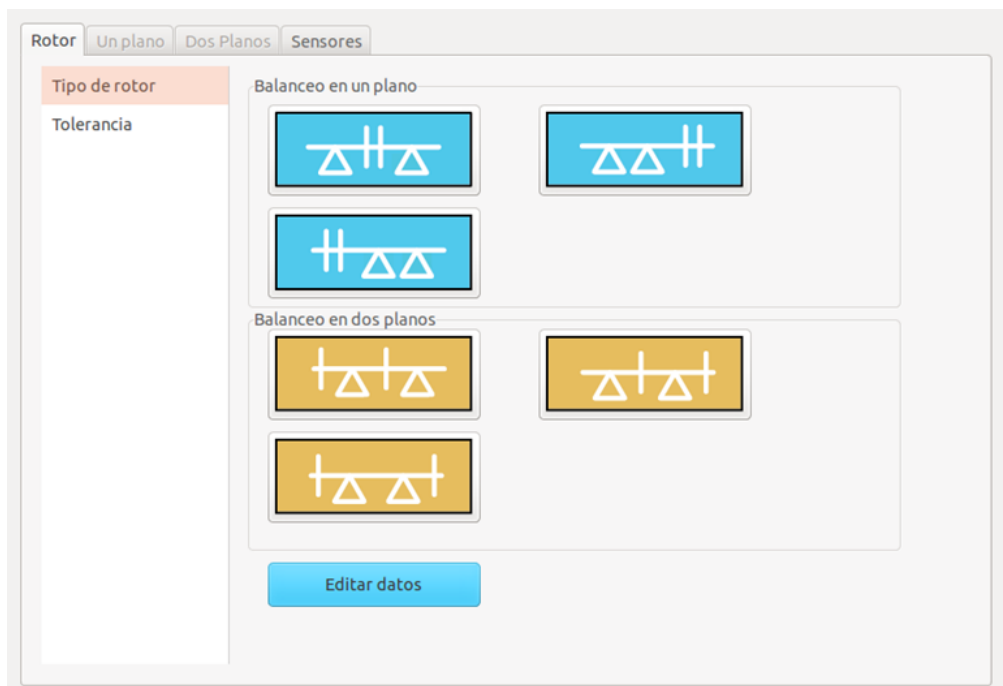


Figura 6.19: Pantalla de selección del rotor

Una vez elegido el tipo de rotor, en este caso un rotor en dos planos, la pantalla cambiara como se indica a continuación.

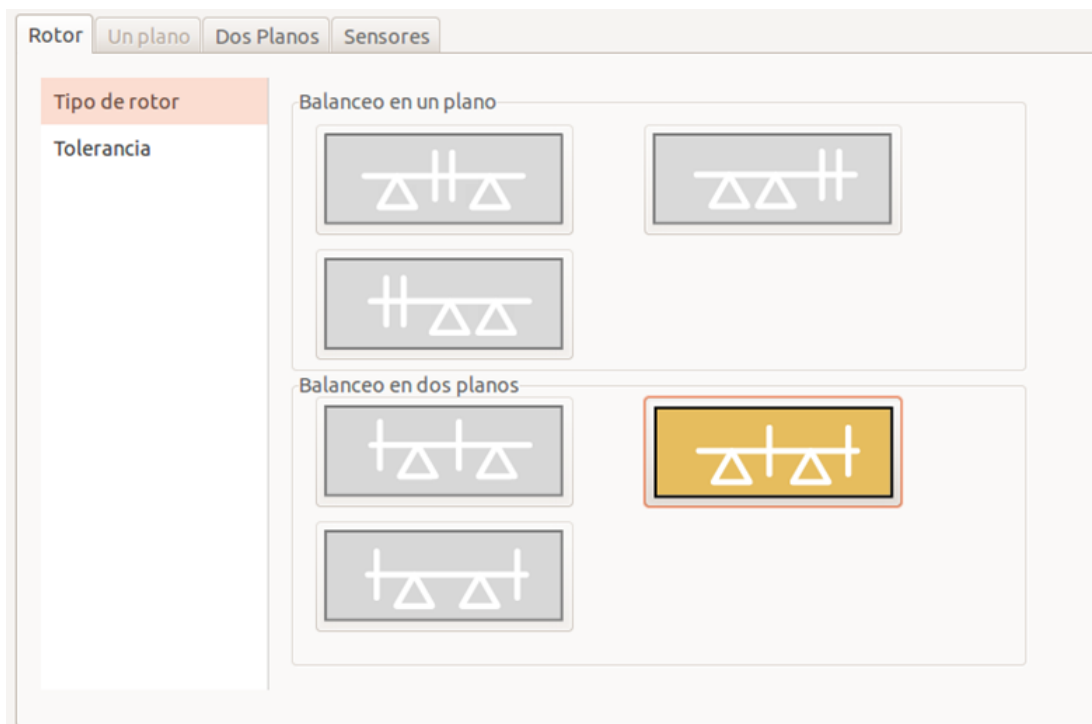


Figura 6.20: Rotor elegido

### 6.9.8. Datos de rotor

Una vez seleccionado el tipo de balanceo que se va a realizar (dos planos para este caso) se muestra la ventana de configuración de balanceo en dos planos donde se abre una nueva ventana con opciones editables, en la cual se deben ingresar los datos del rotor a balancear.

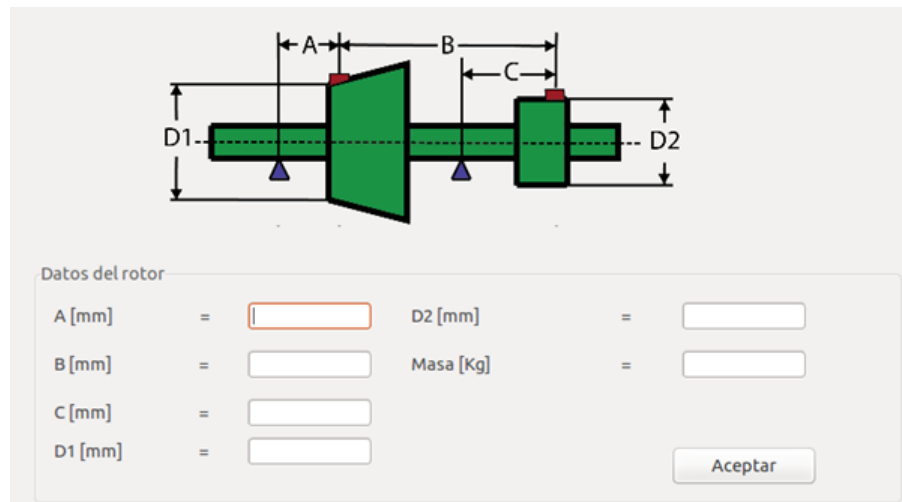


Figura 6.21: Datos rotor

Estos campos de ingreso son obligatorios, pues son necesarios para el correcto funcionamiento del programa, con estos se habilitan las operaciones de tolerancia, generación de reporte y otros.

Los datos deben ser ingresados en milímetros y en kg.

### 6.9.9. Balanceo en un plano

Para cumplir este proceso se debe:

1. Prender el motor y registrar la amplitud de la vibración y el ángulo de fase.
2. Parar el motor y fijar firmemente una masa de prueba al rotor. Registre la masa y posición. (Asegurarse de que la masa de prueba está firmemente unido al rotor. Es un riesgo de seguridad grave si la masa de prueba no está bien colocada y se suelta durante la ejecución de la máquina).
3. Prender el motor y grabar el nuevo ángulo de vibración del rotor y la fase.
4. Parar el motor y retirar la masa de prueba.
5. Se procede a realizar el cálculo de la masa de equilibrio necesario y posición.

6. Fijar firmemente la masa de equilibrio necesaria en la posición calculada en el rotor.
7. Prender el motor y volver a medir la vibración. Si es necesario, realice un nuevo balanceo.

### 6.9.9.1. Pantalla de balanceo

Rotar | Un plano | Dos Planos | Sensores

Elección de plano  
 Soporte A  Soporte B

Desbalanceo original  
 Amplitud [mils]  Angulo [grados]

Plano 1  
 (Diagrama de rotor con un control deslizante y dos masas)

Desbalanceo con masa  
 Datos masa de prueba  
 Masa [gramos]  Angulo [grados]   
  
 Amplitud [mils]  Angulo [grados]

Resultado

Masa [gramos]	Plano	Angulo [grados]
7.721		167.2

Figura 6.22: Resultado balanceo en un plano

### 6.9.9.2. Pantalla de norma ISO 1940

Se proceden a validar los datos en esta ventana



los datos obtenidos, de esta forma se validan los datos obteniendo una pantalla como se muestra a continuación.

The screenshot displays a software interface for rotor balancing verification. At the top, there are tabs for 'Rotor', 'Un plano', 'Dos Planos', and 'Sensores'. The 'Un plano' tab is selected. The interface is divided into several sections:

- Norma ISO 1940:** A dropdown menu is set to 'G250'.
- Tipo de rotor:** A list on the left shows 'Tolerancia' selected.
- Grado de desbalanceo permitido:** A section with three input fields: 'Masa' (32 Kg), 'Velocidad de trabajo' (300 rev/min), and 'Grado de desbalanceo' (254.4 g mm).
- Grado de desbalanceo actual:** A section for 'Plano 1' with 'Radio' (6 mm) and 'Grado de desbalanceo' (42.4 g). The value 42.4 is highlighted in blue, and the text 'Cumple con la norma' is displayed next to it.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Generar reporte' are located below the input fields. A 'Norma ISO' button is at the bottom right.

Figura 6.25: Verificación norma, un plano

Como se puede ver en este ejemplo, los valores obtenidos cumplen la norma escogida. Después de la validación de estos datos, el operador puede obtener un reporte de todo el proceso presionando el botón “Generar reporte”, obteniendo un archivo pdf como se muestra a continuación.

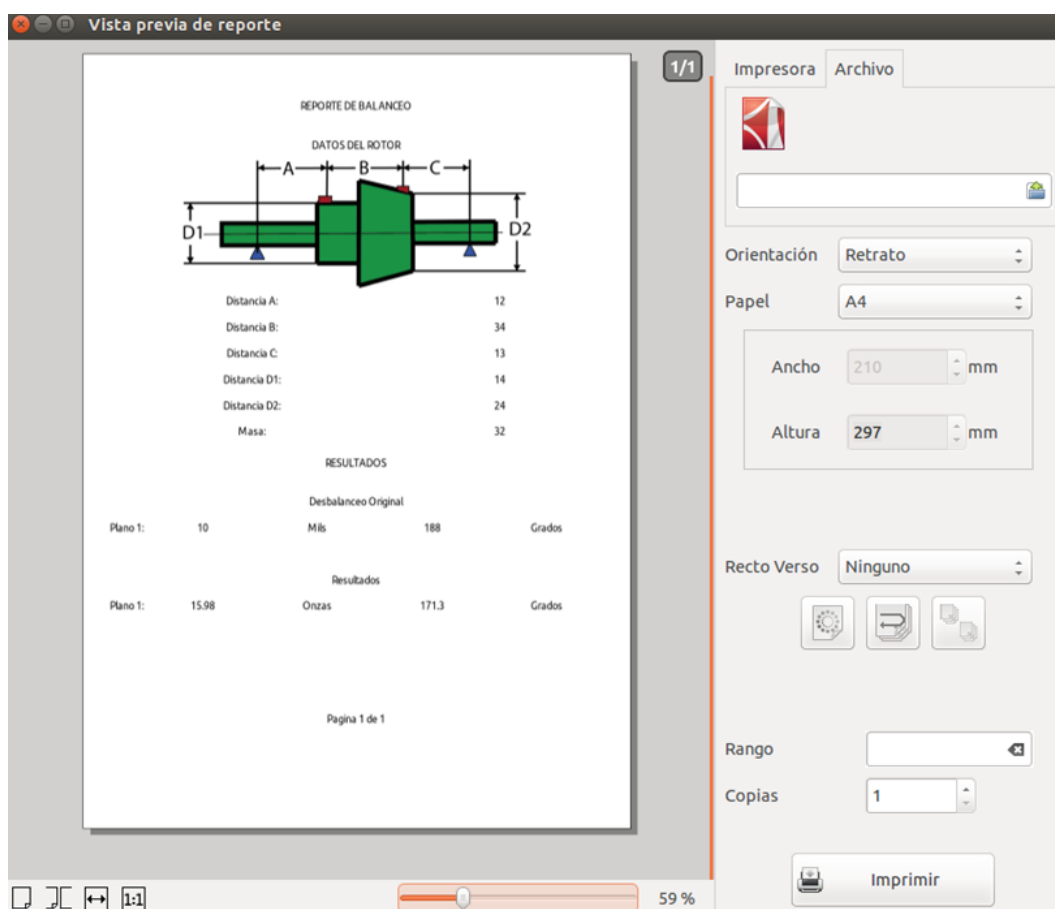


Figura 6.26: Ventana reporte un plano

### 6.9.10. Balanceo en dos planos

Para cumplir este proceso se debe:

1. Prender el motor y registrar la amplitud de la vibración del rotor inicial y ángulo de fase, en ambos cojinetes.
2. Parar el motor y colocar una masa de prueba al plano 1 del rotor. Registrar la masa de prueba y posición (Dada en grados). (Asegúrase de que la masa de prueba esté firmemente unida al rotor. Es un riesgo de seguridad grave si la prueba de peso no está bien colocada y vuela durante la ejecución de la máquina).
3. Prender y registrar la nueva amplitud de vibración del rotor y el ángulo de fase en ambos soportes.
4. Parar el motor y retirar la masa de prueba del plano 1. Colocar una masa de prueba al plano 2 del rotor. Registrar la masa de prueba y posición (Dada en grados). (Asegúrase de que la prueba de peso está firmemente unido al rotor).

Es un riesgo de seguridad grave si la masa de prueba no está bien colocada y se suelta durante la ejecución de la máquina).

5. Prender el motor y registrar la nueva vibración del rotor y el ángulo de fase en ambos soportes.
6. Parar el motor y retirar la masa de prueba del plano 2.
7. Se procede a realizar el cálculo del peso de equilibrio necesario y posición.
8. Fijar firmemente la masa de equilibrio requerida a las posiciones calculadas en los planos 1 y 2 del rotor. (Asegurarse de que las masas de equilibrio están firmemente unidas al rotor. Es un riesgo serio de seguridad si una masa de equilibrio no está firmemente colocado y se suelta mientras se ejecuta la máquina).
9. Prender el motor y vuelva a medir la vibración. Si es necesario, realice un nuevo balanceo.

#### 6.9.10.1. Pantalla de balanceo

The screenshot shows a software interface for balancing a rotor in two planes. At the top, there are tabs for 'Rotor', 'Un plano', 'Dos Planos' (selected), and 'Sensores'. Below the tabs is a 'Tabla de datos' section with a table of vibration data and a 'Desbalanceo original' button.

Desbalanceo	AMPLITUD [milis]		ANGULO DE FASE [grados]	
	Soporte A	Soporte B	Soporte A	Soporte B
Desbalanceo	9	15.8	166	253
Plano 1	27	13.6	133	206
Plano 2	10	12.5	258	185

Below the table are two circular diagrams representing the rotor's cross-section for 'Plano 1' and 'Plano 2'. To the right of these diagrams are input fields for 'Datos masa de prueba' for each plane, with 'Adquirir datos' buttons. For Plano 1, the mass is 5 grams and the angle is 318.96 degrees. For Plano 2, the mass is 5 grams and the angle is 126 degrees.

At the bottom, the 'Resultados' section shows calculated values for each plane:

Plano 1		Plano 2	
Masa [gramos]	Angulo [grados]	Masa [gramos]	Angulo [grados]
2.758	236.5	3.201	95.83

Buttons for 'Calcular [quitar masa]' and 'Borrar datos' are also present.

Figura 6.27: Resultado balanceo en dos planos

#### 6.9.10.2. Pantalla de norma ISO 1940

Se proceden a validar los datos en esta ventana

Figura 6.28: Norma ISO 1940 Balanceo en dos planos

Para poder observar la gráfica de la norma ISO 1940, se debe presionar el botón “Norma ISO”, desplegándose la gráfica, como se muestra a continuación.

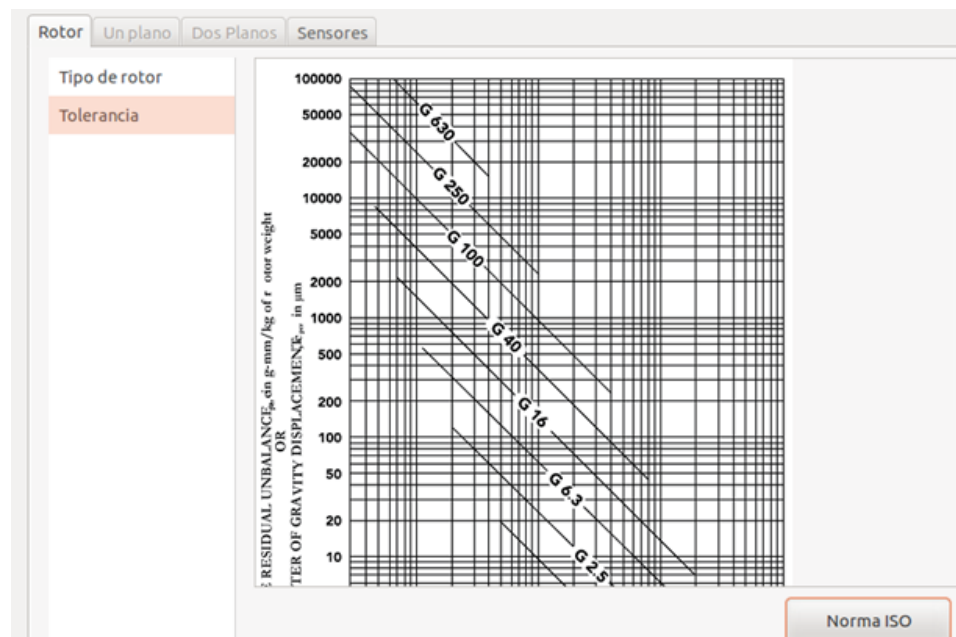


Figura 6.29: Ventana con gráfica norma ISO 1940

Después de ingresar todos los valores, se compararan los datos de la norma con los datos obtenidos, de esta forma se validan los datos obteniendo una pantalla como se muestra a continuación.



Rotor Un plano Dos Planos Sensores

Tipo de rotor  
 Tolerancia

Norma ISO 1940 G1600

Cigüeñales de motores de dos tiempos montados sobre soportes rígidos.

Grado de desbalanceo permitido

Masa  Kg  
 Velocidad de trabajo  rev/min  
 Grado de desbalanceo  g mm

Grado de desbalanceo actual

Plano 1  
 Radio  mm  
 Grado de desbalanceo  g Cumple con la norma

Plano 2  
 Radio  mm  
 Grado de desbalanceo  g Cumple con la norma

Figura 6.30: Verificación norma, dos planos

Como se puede ver en este ejemplo, los valores obtenidos cumplen la norma escogida. Después de la validación de estos datos, el operador puede obtener un reporte de todo el proceso presionando el botón “Generar Reporte”, obteniendo un archivo pdf como se muestra a continuación.

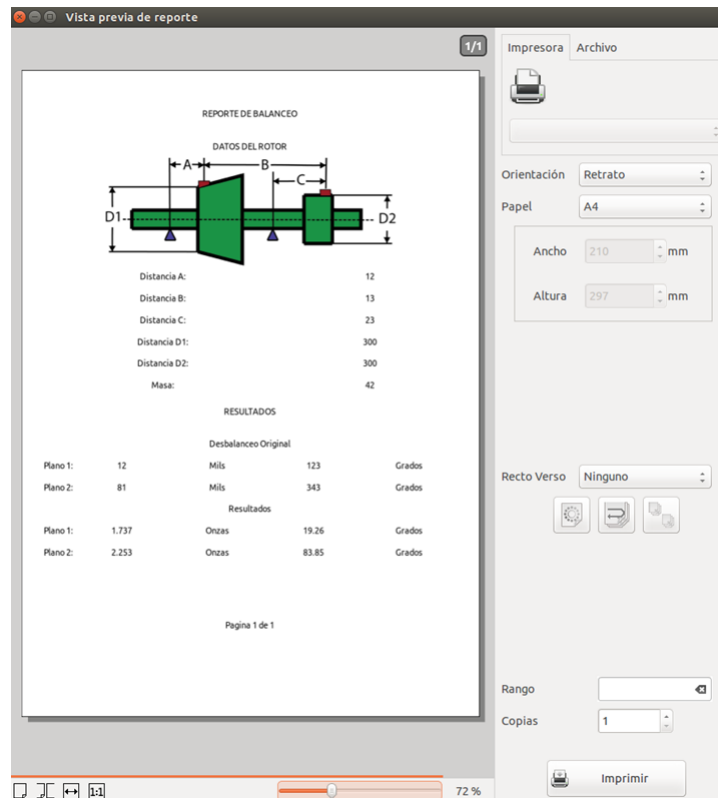


Figura 6.31: Ventana reporte dos plano

### 6.9.11. Sensores

En la última pestaña correspondiente a sensores se muestran los valores en tiempo real, observándose así el funcionamiento de los piezosensores y del encoder.



Figura 6.32: Pantalla sensores

## **Capítulo 7**

# **RESULTADOS DE ENSAYOS DE BALANCEO**

### **7.1. Balanceo en dos planos**

Para el ensayo de balanceo, se utilizo un rotor el cual tiene un eje de  $600\pm 1$  mm de largo con un diámetro de 2 pulgadas , en este se encuentran 2 discos de  $30\pm 1$  mm de espesor con  $300\pm 1$  mm de diámetro y masa de  $42\pm 0.1$  kg

### **7.2. Descripción física del rotor**

El rotor se encuentra desbalanceado, debido a los cordones de soldadura que unen los discos con el eje, ademas que la superficie de estos no son totalmente uniformes.

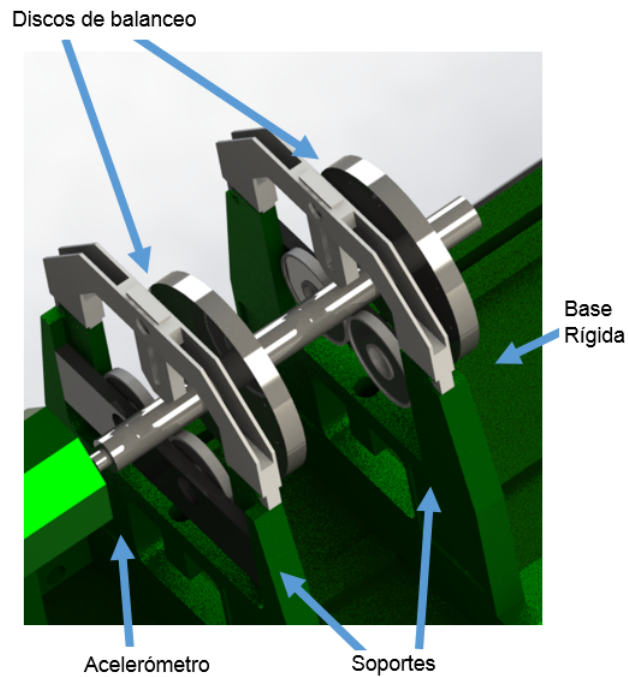


Figura 7.1: Rotor Solidworks

### 7.3. Cálculo de masa de prueba

$$M_p = 321,7 \left( \frac{W_p}{N^2 r} \right) \quad (7.1)$$

$$M_p = 321,7 \left( \frac{42 * 9,8}{760^2 (150)} \right) \quad (7.2)$$

$$M_p = 1,5g \quad (7.3)$$

### 7.4. Ensayo de balanceo

Se coloca el rotor en los dos soportes rígidos de la máquina, como se indica en la siguiente figura

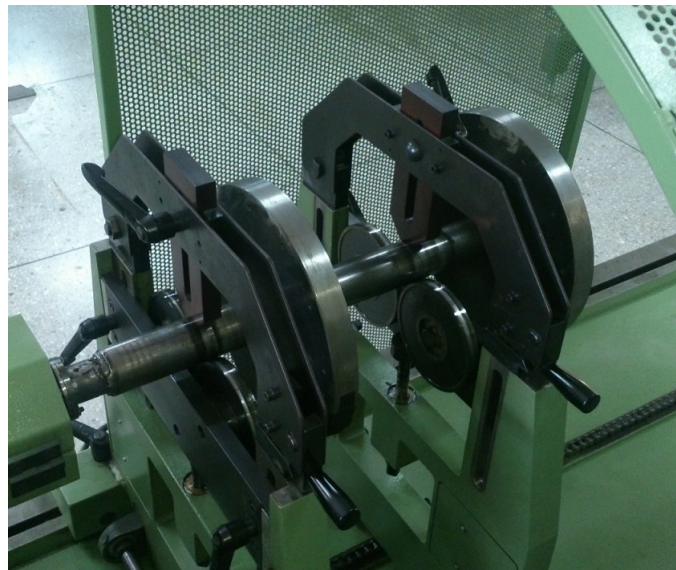


Figura 7.2: Rotor implementado

Se coloca los datos del rotor en el programa, luego de haber elegido el tipo de rotor.

Datos Rotor

A [mm]	=	<input type="text" value="90"/>	D2 [mm]	=	<input type="text" value="300"/>
B [mm]	=	<input type="text" value="32"/>	Masa [Kg]	=	<input type="text" value="50"/>
C [mm]	=	<input type="text" value="13"/>			
D1 [mm]	=	<input type="text" value="300"/>			

Figura 7.3: Datos Rotor

Luego se coloca la masa de prueba de 5 gramos en el plano 1, y de la misma forma en el plano 2.



Figura 7.4: Masa de prueba de 5 gramos

Obteniendo los siguientes resultados.

Rotor  Un plano  Dos Planos  Sensores

Tabla de datos

Desbalanceo	AMPLITUD [milis]		ANGULO DE FASE [grados]		Desbalanceo original
	Soporte A	Soporte B	Soporte A	Soporte B	
Desbalanceo	80	34.5	192	132	
Plano 1	78	40	175	125	
Plano 2	76	42.2	193	135	

Plano 1  Plano 2

Datos masa de prueba Plano 1  
Masa [gramos]: 5, Angulo [grados]: 275.04

Datos masa de prueba Plano 2  
Masa [gramos]: 5, Angulo [grados]: 155.52

Resultados

	Plano 1		Plano 2	
	Masa [gramos]	Angulo [grados]	Masa [gramos]	Angulo [grados]
	17.78	188.6	16.86	272.5

Figura 7.5: Datos Rotor Balanceo1

En el siguiente cuadro, se presentan las masas y ángulos de corrección.

Tabla 7.1: Masas de corrección primera iteración

Plano	Masa de corrección [gramos]	Posición angular[grados]
1	17.78	168.5
2	16.86	272.5

Validando los resultados con la norma ISO 1940, se puede apreciar que los resultados no cumplen esta, pues la norma solo admite un desbalanceo de 2.65g como se indica en la siguiente figura.

The screenshot displays a software interface for rotor balancing. On the left, a sidebar lists 'Tipo de rotor' and 'Tolerancia'. The main area is titled 'Rotor' and includes tabs for 'Un plano', 'Dos Planos', and 'Sensores'. The 'Norma ISO 1940' is set to 'G250'. The rotor type is 'Cigüeñales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre'. Under 'Grado de desbalanceo permitido', the mass is 50 Kg, the balancing speed is 300 rev/min, and the calculated unbalance is 397.5 g mm. Below this are buttons for 'Calcular' and 'Generar reporte'. On the right, under 'Grado de desbalance actual', two planes are shown: 'Plano 1' and 'Plano 2', both with a radius of 150 mm and a required unbalance of 2.65 g, both marked as 'No cumple'. A 'Norma ISO' button is located at the bottom right.

Figura 7.6: Datos norma balanceo 1

Al probar las masas de equilibrio indicados anteriormente, se disminuyo el desbalanceo, pero para poder cuantificar el nuevo desbalanceo en el rotor se debe usar nuevamente masas de prueba.

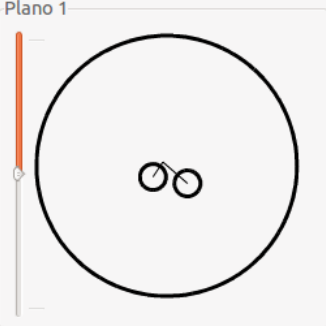


Rotor Un plano **Dos Planos** Sensores

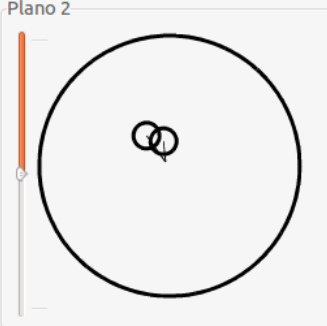
Tabla de datos

Desbalanceo	AMPLITUD [milis]		ANGULO DE FASE [grados]		Desbalanceo original
	Soporte A	Soporte B	Soporte A	Soporte B	
Desbalanceo	9	15.8	166	253	
Plano 1	27	13.6	133	206	
Plano 2	10	12.5	258	185	

Plano 1



Plano 2



Datos masa de prueba Plano 1

Masa [gramos] Angulo [grados]

5 318.96

Adquirir datos

Datos masa de prueba Plano 2

Masa [gramos] Angulo [grados]

5 126

Adquirir datos

Resultados

Calcular [quitar masa]

Plano 1		Plano 2	
Masa [gramos]	Angulo [grados]	Masa [gramos]	Angulo [grados]
2.758	236.5	3.201	95.83

Borrar datos

Figura 7.7: Datos balanceo 2

Realizando nuevamente los pasos para el balanceo, se obtuvieron las siguientes respuestas.

Tabla 7.2: Masas de corrección segunda iteración

Plano	Masa de corrección [gramos]	Posición angular[grados]
1	2.758	236.5
2	3.2	95.83

**Rotor** | Un plano | **Dos Planos** | Sensores

Tipo de rotor: **Norma ISO 1940** | G250

Tolerancia: **Cigüenales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre**

**Grado de desbalanceo permitido**  
 Masa: 50 Kg  
 Velocidad de balanceo: 300 rev/min  
 Grado de desbalanceo: 397.5 g mm

**Grado de desbalanceo actual**  
 Plano 1: Radio 150 mm, Grado de desbalanceo 2.65 g **No cumple**  
 Plano 2: Radio 150 mm, Grado de desbalanceo 2.65 g **No cumple**

Botones: **Calcular**, **Generar reporte**, **Norma ISO**

Figura 7.8: Datos norma balanceo 2

Como se aprecia todavía no se cumple con la norma ISO G250, por lo que se deben colocar nuevamente las masas de equilibrio antes obtenidas, realizando el proceso de balanceo se obtuvieron los datos descritos en la siguiente figura.

**Rotor** | Un plano | **Dos Planos** | Sensores

**Tabla de datos**

Desbalanceo	AMPLITUD [milis]		ANGULO DE FASE [grados]		Desbalanceo original
	Soporte A	Soporte B	Soporte A	Soporte B	
Plano 1	12	9.2	41	295	
Plano 2	23	13.6	182	207	
Plano 2	16	12.5	29	161	

Datos masa de prueba Plano 1: Masa [gramos] 5, Angulo [grados] 20.88  
 Datos masa de prueba Plano 2: Masa [gramos] 5, Angulo [grados] 165.6

**Resultados**  
 Plano 1: Masa [gramos] 1.751, Angulo [grados] 35.83  
 Plano 2: Masa [gramos] 2.301, Angulo [grados] 103.1

Botones: **Calcular [agregar masa]**, **Borrar datos**, **Adquirir datos**

Figura 7.9: Datos balanceo 3

Como se observa en la figura anterior, la masa que origina el desbalance es:

Tabla 7.3: Masas de corrección tercera iteración

Plano	Masa de corrección [gramos]	Posición angular[grados]
1	1.751	35.83
2	2.301	103.1

Al tener estas masas, se cumple con la norma y se tiene un balanceo correcto.

The screenshot shows a software interface for rotor balancing. At the top, there are tabs: "Rotor" (selected), "Un plano", "Dos Planos", and "Sensores". Below the tabs, there is a section for "Tipo de rotor" with a dropdown menu set to "Tolerancia". To the right, the "Norma ISO 1940" is set to "G250". The description of the rotor is "Cigüñales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre".

Under "Grado de desbalance permitido", the input fields are:
 

- Masa: 50 Kg
- Velocidad de balanceo: 300 rev/min
- Grado de desbalanceo: 397.5 g mm

 Below these fields are buttons for "Calcular" and "Generar reporte".

Under "Grado de desbalance actual", there are two planes:
 

- Plano 1: Radio 150 mm, Grado de desbalanceo 2.65 g, with the text "Cumple con la norma" in blue.
- Plano 2: Radio 150 mm, Grado de desbalanceo 2.65 g, with the text "Cumple con la norma" in blue.

 At the bottom right, there is a button labeled "Norma ISO".

Figura 7.10: Datos norma balanceo 3

Se puede apreciar que la amplitud de la vibración ha disminuido significativamente como se indica en la siguiente figura:

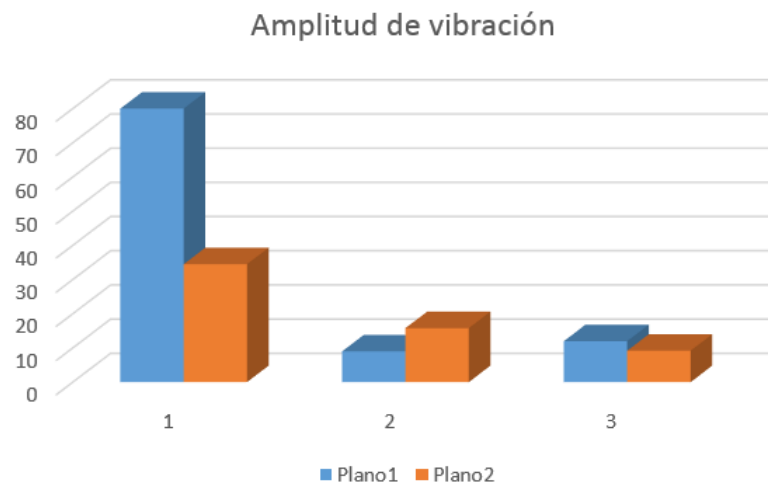


Figura 7.11: Amplitud de vibración para cada iteración de balanceo

Se comprueba que la señal de vibración ha disminuido, verificando la señal que entrega el sensor y graficándola en matlab.

Para el sensor A se tiene el siguiente gráfico

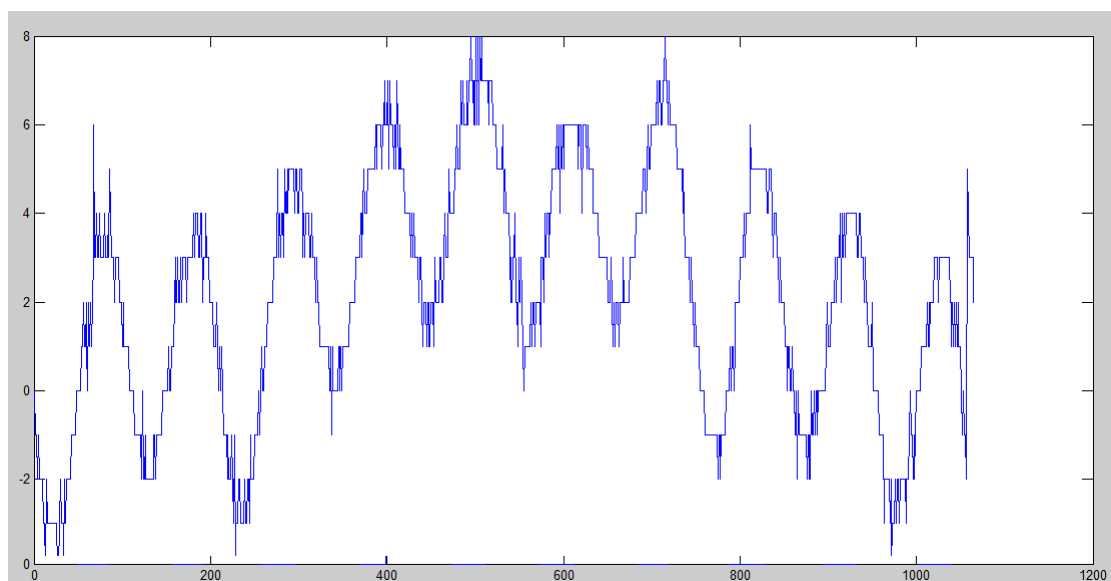


Figura 7.12: Lectura sensor A

Para el sensor B se tiene el siguiente gráfico

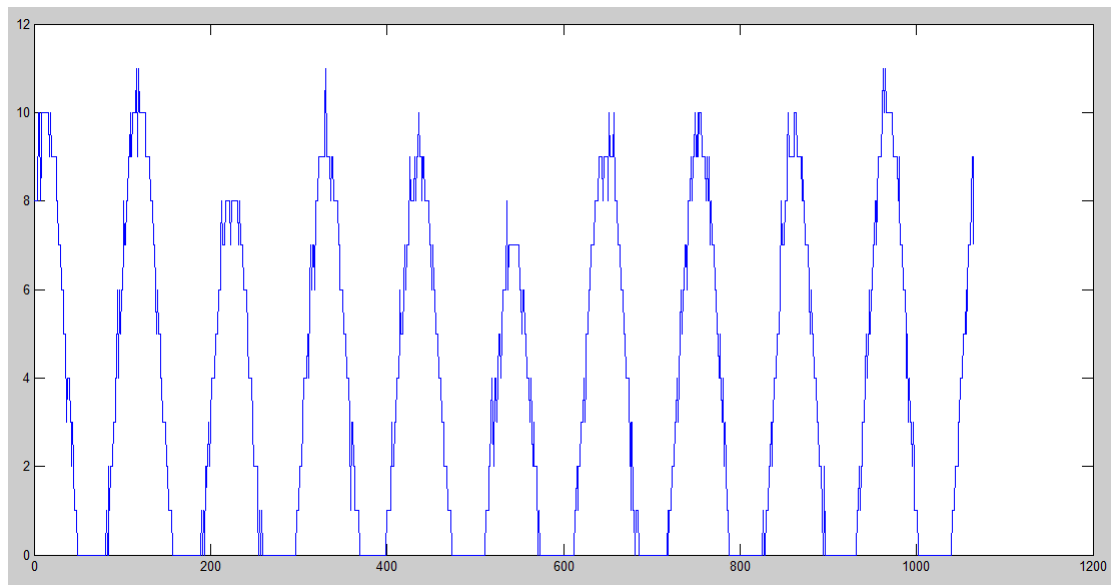


Figura 7.13: Lectura Sensor B

## 7.5. Cálculo de coeficientes de balanceo

$$a_{11} = \frac{A_1 - A}{m_1} \quad (7.4)$$

$$a_{12} = \frac{A_2 - A}{m_2} \quad (7.5)$$

$$a_{21} = \frac{B_1 - B}{m_1} \quad (7.6)$$

$$a_{22} = \frac{B_2 - B}{m_2} \quad (7.7)$$

Para el ensayo se tiene:

$$A = 80, 192^\circ \text{ ( -78.2518 ; -16.6329)}$$

$$A_1 = 78, 175^\circ \text{ ( -77.7032 ; 6.7981 )}$$

$$A_2 = 76, 193^\circ \text{ ( -74.0521; -17.0963)}$$

$$B = 34,5, 132^\circ \text{ ( -23.085 ; 25.6385 )}$$

$$B_1 = 40, 125^\circ \text{ ( -22.9431; 32.7661 )}$$

$$B_2 = 42,2, 135^\circ \text{ ( -29.8399; 29.8399 )}$$

$$m_1 = 5g$$

$$m_2 = 5g$$

$$a_{11} = \frac{A_1 - A}{m_1} = 0,1097 + 4,686i \quad (7.8)$$

$$a_{12} = \frac{A_2 - A}{m_2} = 0,8399 - 0,0927i \quad (7.9)$$

$$a_{21} = \frac{B_1 - B}{m_1} = 0,0284 + 1,4255i \quad (7.10)$$

$$a_{22} = \frac{B_2 - B}{m_2} = -1,351 + 0,8403i \quad (7.11)$$

$$\alpha = \frac{a_{21}}{a_{11}} = 0,3042; \beta = \frac{a_{12}}{a_{22}} = 0,5311$$

Al tener los coeficientes cercanos a 0.5 se puede balancear en 2 planos.

## 7.6. Cálculo del error

Se realizan 30 pruebas, obteniendo las siguientes gráficas

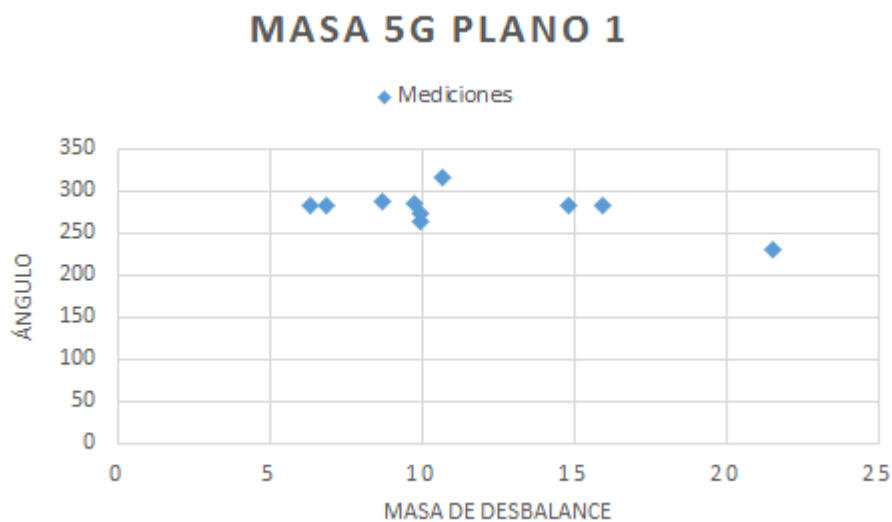


Figura 7.14: Datos masa 5g Plano 1

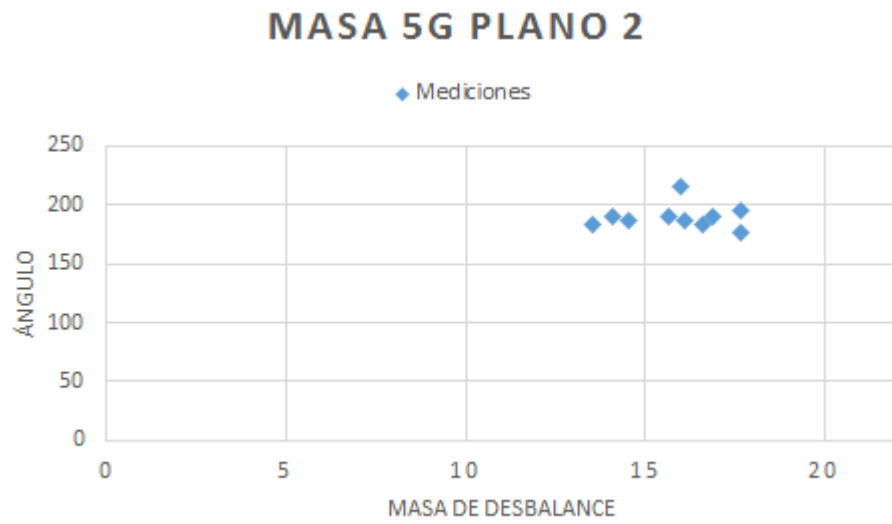


Figura 7.15: Datos masa 5g Plano 2

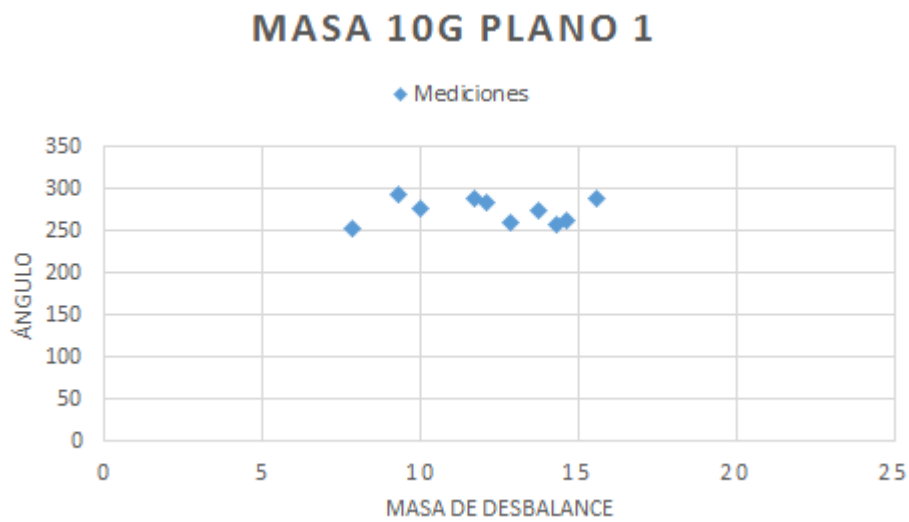


Figura 7.16: Datos masa 10g Plano 1

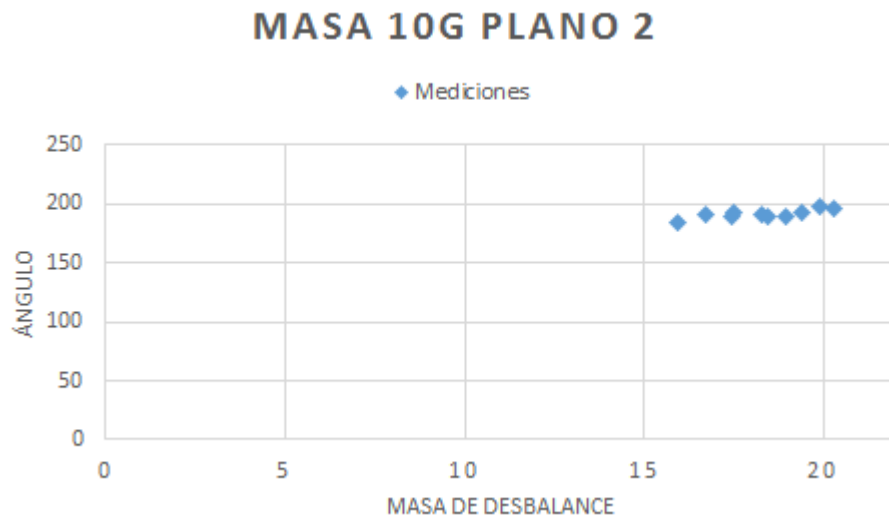


Figura 7.17: Datos masa 10g Plano 2

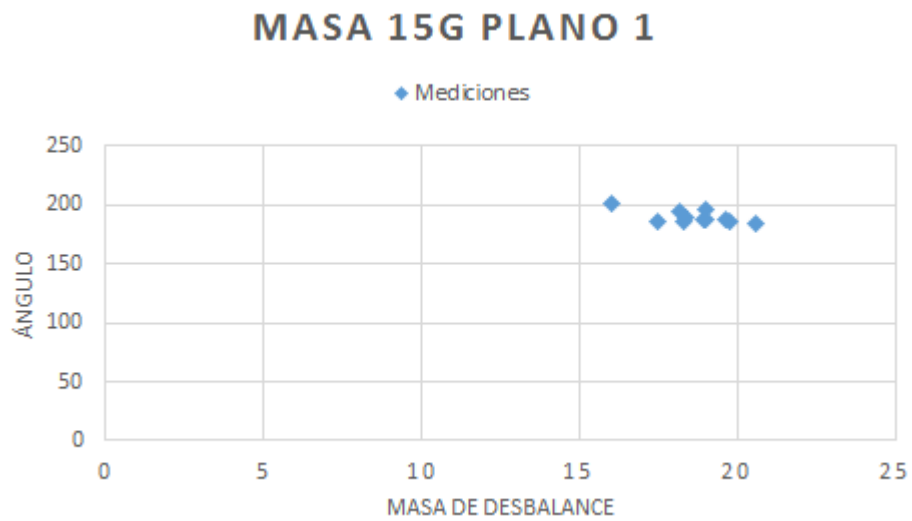


Figura 7.18: Datos masa 15g Plano 1



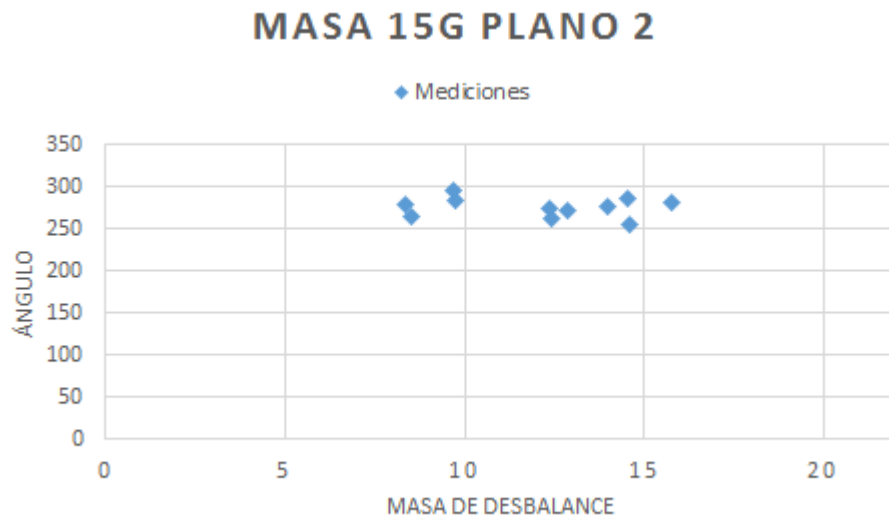


Figura 7.19: Datos masa 15g Plano 2

Y calculando el error se obtiene la siguiente tabla

Tabla 7.4: Errores obtenidos

	P1	P2	G1	G2
5	3.17	1.45	19.91	10.38
10	2.80	1.36	15.70	3.90
15	1.44	2.23	5.87	11.20

Se puede apreciar que el error disminuye a mayor masa de prueba de balanceo.

Un factor importante que intrduce incerteza en los ensayos realizados, es que las masas de prueba se diferencian mucho de ser “masas puntuales”, ya que no se las puede colocar en un ángulo específico sino en un rango, además de que para la inclusión de las masas en el sistema se han utilizado cinta adhesiva, introduciendo un error en el radio y en la masa.

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló un programa de balanceo con una interfaz gráfica de usuario (GUI) amigable, con capacidad de configurar distintos parámetros, cálculo y visualización de diagramas fasoriales de desbalanceo para uno y dos planos.
- Se redujo el desbalance en dos planos de un rotor de 42 kg a un valor inferior a 25.5 g.mm en ambos planos. El factor limitante para continuar balanceando fue la falta masas de prueba menores a un gramo.
- Se demostró que en el proceso de filtrado de la señal analógica de los sensores piezoeléctricos, se eliminaron las frecuencias menores a la frecuencia de trabajo del rotor, la cual es de 12 hz, obteniendo una señal limpia y adecuada para nuestro análisis de vibración.
- Se diseñaron y construyeron circuitos analógicos de acondicionamiento de señal.
- El error disminuye conforme se aumenta la masa de prueba, pues genera un cambio mayor en la vibración que es detectada por los sensores.
- La protección móvil operada reduce el riesgo de impacto entre el operador, el rotor y la masa de prueba a niveles aceptables.
- Se comprobó el funcionamiento del nuevo sistema de control, tanto su integración con el sistema de potencia electrónico de la máquina como con la interfaz y se realizó el mantenimiento mecánico de la balanceadora, comprobando su funcionamiento en marcha.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar el trabajo en el análisis integral de vibraciones que permita un diagnóstico certero del buen funcionamiento de una máquina. Incluyendo sensores de vibraciones axiales para detección de vibraciones por desalineación, análisis de señales a otras frecuencias y sus múltiplos para diferentes componentes rotantes de una máquina, como por ejemplo los engranajes y cojinetes de una caja reductora, frecuencias relacionadas con los pasos de alabes de bombas, turbinas y compresores, etc.
- Se recomienda profundizar en el estudio de desbalance, sus distintos métodos y algoritmos, ya que se tiene un programa de código abierto que se lo puede modificar y mejorar para realizar pruebas con otros métodos.
- Para mejorar el análisis de resultados del proceso de balanceo, se recomienda crear una base de datos, la cual también ayudará para tener un registro de uso de la máquina.

## Bibliografía

[IEC, ] Iec 60269-1 fourth edition 2006-11.

[Balancing, 2009] Balancing, I. (2009). Balance quality requirements of rigid rotors the practical application of iso 1940/1.

[Carella, ] Carella, A. R. Analisis de vibraciones y diseno de un sistema de balanceo para rotor de alta velocidad. Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comision de energía Atómica, Argentina.

[Chigbogu C. Ozoegwu, 2012] Chigbogu C. Ozoegwu, Christian. C. Nwangwu, C. F. U. A. V. O. (2012). zpure analytical approach to rotational balancing. *Journal of Safety Engineering*.

[David Bukowitz, ] David Bukowitz, I.M., M. *Principios y Técnicas de Balanceo de Rotores*. Austin Dynamical Systems, LLC, Dynamic Systems, Inc. 3901 S. Austin, Texas.

[Laurent Giraud, 2009] Laurent Giraud, Ph. D., j. e. r. R. D. I. (2009). *Machine safety, prevention of mechanical hazards, Fixed guards and safety distances*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST).

[M., 2006] M., E. E. P. C. S. M. L. C. (1 de junio de 2006). Development of a virtual instrument for rotor dynamics balancing. *Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 14 N° 2, 2006, pp. 146-152.

[Molina, 1998] Molina, J. (1998). *Apuntes de control industrial*. Quito, Ecuador.

[Pareja, ] Pareja, A. M. *Instalaciones eléctricas de interior, automatismos y cuadros eléctricos*. 2da Edición.

[Ronald L. Eshleman, 2002] Ronald L. Eshleman, Ph.D., P. D. V. I. (2002). *Vibraciones básicas de máquinas Introducción al análisis básico de maquinaria*. VIPress, Incorporated.

[Sosa, ] Sosa, R. E. Desarrollo de un sistema de balanceo para turbinas de baja potencia. Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Comision de energía Atómica, Argentina.

[y J. Keith Nisbett, 2008] y J. Keith Nisbett, R. G. B. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill.

[y Kendall, 2011] y Kendall, K. (2011). *ANALISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS*. Pearson, octava edición edition.

# **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**Planos eléctricos**

**ANEXO B**  
**Planos mecánicos**



**ANEXO C**  
**Manual de usuario**