

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PASANTÍA
DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA EL BALANCEO EN UN SOLO PLANO
DE ROTORES RÍGIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS VECTORIAL Y DE
VIBRACIONES PARA LA EMPRESA SIGA S.A.S.**



Por:
Yineth Daniela Fúquene García



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2025**

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PASANTÍA
DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA EL BALANCEO EN UN SOLO PLANO
DE ROTORES RÍGIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS VECTORIAL Y DE
VIBRACIONES PARA LA EMPRESA SIGA S.A.S.**



Por:
Yineth Daniela Fúquene García

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero mecánico

Aprobado por:
Ing. BYRON DAVID IGUA MUÑOZ
Magíster en Ingeniería Mecánica
Tutor Universidad

Ing. EWDES ANDRÉS HERNÁNDEZ BASTILLA
Tutor Empresa

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2025**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.
Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.
Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN
Secretaria General Seccional Villavicencio

PhD. Handel Andrés MARTÍNEZ SARACHE
Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica

DEDICATORIA

Con todo mi corazón, dedico este trabajo a mi familia, en especial a mi mamá, Sandra Fúquene, y a mi tía, Luz Fúquene. Su amor, apoyo incondicional y fe en mí han sido la base sobre la que he construido mi camino profesional. Desde el inicio de esta carrera, que en su momento parecía un sueño lejano, nunca dejaron de alentarme, impulsarme y recordarme que con esfuerzo y determinación todo es posible.

Cada logro, cada aprendizaje y cada página de este trabajo llevan impreso su sacrificio, su paciencia y su confianza en mí. Sin ellas, este proyecto no sería una realidad. Hoy, con gratitud infinita, les entrego este logro, porque más que mío, es de ellas.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi tía, Luz Fúquene, quien fue el pilar fundamental en mi camino académico. Gracias a su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional, tuve la oportunidad de cursar mi pregrado. No solo me brindó la ayuda económica necesaria para hacer realidad este sueño, sino que también fue mi mayor motivación, impulsándome en cada etapa para no rendirme y culminar con éxito este proyecto.

A mi mamá, Sandra Fúquene, le agradezco infinitamente por ser mi refugio y mi guía, por su amor inquebrantable y por recordarme siempre quién soy y de lo que soy capaz. Su apoyo incondicional y sus palabras de aliento han sido mi fuerza en los momentos de mayor desafío.

Le agradezco todas las personas que, de una u otra manera, han estado presentes en este camino, brindándome su apoyo, sus enseñanzas y su confianza, les estaré eternamente agradecida.

GLOSARIO

W_c : Peso de corrección en el método de 4 corridas.

$\vec{O}$: Vector de desbalance original.

m_{cal} : Peso de calibración.

$\vec{m_{cal}}$: Magnitud de pesos de calibración y dirección.

r_u : radio de instalación del peso de calibración.

Ω : Velocidad de giro.

$\vec{T}$: Vector de Total debido al desbalance original más respuesta del peso prueba.

$\vec{C}$: Vector de respuesta debido exclusivamente al peso prueba.

$-\vec{O}$: Vector opuesto del desbalance original.

OT : Ángulo el lado O y T.

TC : Ángulo el lado T y C.

OC : Ángulo el lado O y C.

m : Masa de corrección.

m_1 : Masa de corrección dividida en posición 1.

m_2 : Masa de corrección dividida en posición 2.

U_{per} : Desbalance permisible.

U_{res} : Desbalance residual.

e_{per} : Desbalance específico residual permisible.

G : Grado de calidad.

F : Amplitud vector final.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO.....	6
INTRODUCCIÓN	16
1. PERFIL DE LA EMPRESA	17
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
3. OBJETIVOS.....	24
3.1. OBJETIVO GENERAL	24
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4. METODOLOGÍA	25
4.1. ETAPA 1: ANÁLISIS	25
4.2. ETAPA 2: DISEÑO	25
4.3. ETAPA 3: DESARROLLO.....	25
4.4. ETAPA 4: PRUEBAS	25
4.5. ETAPA 5: IMPLEMENTACIÓN.....	26
5. MARCO NORMATIVO.....	27
5.1. API 670 – SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE MAQUINARIA.....	27
5.2. ISO 20816 – EVALUACIÓN DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS	27
5.3. ISO 13373 – MONITOREO DE CONDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	28
5.4. ISO 21940 – BALANCEO DE ROTORES.....	28
6. ACTIVIDADES REALIZADAS.....	30
6.1. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS	37
6.1.1. BALANCEO	37

6.1.1.1.	BALANCEO ESTÁTICO	37
6.1.1.2.	MÉTODO DE 4 CORRIDAS	37
6.1.1.3.	MÉTODO GRÁFICO CON PESOS DE CALIBRACIÓN	40
6.1.1.4.	ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL BALANCEO GRÁFICO	62
6.1.2	DIVISIÓN DE PESO	66
6.1.2.1.	EJEMPLO DIVISIÓN DEL PESO.....	69
6.1.3.	VERIFICACIÓN DE BALANCEO CON NORMA ISO 21940.....	70
6.1.3.1	EJEMPLO VERIFICACIÓN DE BALANCEO	74
6.1.4	ANÁLISIS DE FUNCIONALIDADES Y REQUERIMIENTOS.....	76
6.2.	LÓGICA DE PROGRAMACIÓN	83
6.2.1.	LÓGICA DE PROGRAMACIÓN MÓDULO DE BALANCEO	84
6.2.2.	LÓGICA DE PROGRAMACIÓN MÓDULO DE DIVISIÓN DE PESO	89
6.2.3.	LÓGICA DE PROGRAMACIÓN MÓDULO DE VERIFICACIÓN.	90
6.3.	DISEÑO	92
6.3.1.	DISEÑO MÓDULO DE BALANCEO.....	93
6.3.2.	DISEÑO MÓDULO DE DIVISIÓN DE PESO	98
6.3.3.	DISEÑO MÓDULO DE VERIFICACIÓN	99
6.4.	RESULTADOS	100
6.4.1.	RESULTADO Y PRUEBA MÓDULO DE BALANCEO.....	100
6.4.2.	RESULTADO Y PRUEBA MÓDULO DE DIVISIÓN DE PESO.....	108
6.4.3.	RESULTADO Y PRUEBA MÓDULO DE VERIFICACIÓN.....	110
6.4.4.	RESULTADO DE PROCESO DE BALANCEO Y VERIFICACIÓN EN MOTOVENTILADOR	114
7.	ANÁLISIS DOFA.....	124
7.1.	ANÁLISIS EMPRESA	124

7.1.1. DEBILIDADES	124
7.1.2. OPORTUNIDADES.....	125
7.1.3. FORTALEZAS	125
7.1.4. AMENAZAS	126
7.2. ANÁLISIS PERSONAL	126
7.2.1. DEBILIDADES	127
7.2.2. OPORTUNIDADES.....	128
7.2.3. FORTALEZAS	128
7.2.4. AMENAZAS	128
8. APORTES.....	129
9. LECCIONES APRENDIDAS.....	131
10. RECOMENDACIONES.....	132
11. CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	137

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 6-1. Cronograma de actividades.	30
Tabla 6-2. Resultados primera corrida	54
Tabla 6-3. Resultados segunda corrida.....	56
Tabla 6-4. Resultados de balanceo.....	60
Tabla 6-5. Comparación amplitudes de vibraciones antes y después del proceso de balanceo.....	61
Tabla 6-6 Datos de balanceo ejemplo de verificación	74
Tabla 6-7. Preguntas.....	76
Tabla 6-8. Variables de entrada y salida módulo de balanceo.	84
Tabla 6-9. Variables de entrada y salida del módulo división de peso.	89
Tabla 6-10. Variables de entrada y salida del módulo de verificación.....	91
Tabla 6-11. Controles utilizados	92
Tabla 6-12. Valores ejercicio prueba módulo de balanceo.....	100
Tabla 6-13. Valores datos balanceo .csv.	105
Tabla 6-14. Resultados corrida 1 – Prueba 1 <i>rotorkit</i>	105
Tabla 6-15. Resultados vibración después de balanceo – Prueba 1 <i>rotorkit</i>	106
Tabla 6-16 Resultados corrida 1 – Prueba 2 <i>rotorkit</i>	107
Tabla 6-17. Resultados vibración después de balanceo – Prueba 2 <i>rotorkit</i>	108
Tabla 6-18. Datos módulo de verificación .csv.	114
Tabla 6-19. Resultados 1X primera corrida.....	114
Tabla 6-20. Resultados 1X segunda corrida con peso prueba.....	116
Tabla 6-21. Resultados finales 1X del proceso de balanceo.....	118

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1-1. Estructura organizacional empresa SIGA SAS.	18
Figura 2-1. Metodología del sistema de monitoreo en línea para proximidad.	20
Figura 2-2. Monitoreo en plataforma del motoventilador.	20
Figura 2-3. Tipos de desbalance.	21
Figura 2-4. Espectro ventilador, plano 3YD y 4YD.	22
Figura 2-5. Variable Amplitud 1X y fase.	22
Figura 4-1 Metodología.	25
Figura 4-2. <i>Rotor kit RK4</i>	26
Figura 6-1. Ejemplo Marcas de posiciones de peso prueba (Método 4 corridas)..	38
Figura 6-2. Gráfico de resultado a peso prueba por corrida. (Método 4 corridas).	39
Figura 6-3. Vector resultante. (Método 4 corridas).	39
Figura 6-4. Dirección de referencia externa.	41
Figura 6-5. Etiqueta sentido de rotación.	41
Figura 6-6. Ubicación de transductor.	42
Figura 6-7. Referencia dada por el transductor.	42
Figura 6-8. Grafica de vector original.	43
Figura 6-9. Instalación del peso de calibración.	44
Figura 6-10. Gráfico vector de respuesta total.	45
Figura 6-11. Resultante, respuesta debido al peso de calibración.	46
Figura 6-12. Vector original opuesto.	46
Figura 6-13. Traslado vector de respuesta al peso de calibración.	47

Figura 6-14. Rotación vector C y peso de calibración.	48
Figura 6-15. CAD Rotor kit RK4.	49
Figura 6-16. Probeta de proximidad.	50
Figura 6-17. Probetas de proximidad rotor kit	50
Figura 6-18. Referencia sensores.	51
Figura 6-19. Referencia <i>keyphasor</i>	51
Figura 6-20. Instalación y pesaje masa de desbalance.	52
Figura 6-21. Vibraciones directas antes del balanceo.	53
Figura 6-22. Espectro de frecuencia lado acople.	53
Figura 6-23. Espectro de frecuencia lado libre.	54
Figura 6-24. Gráfica vector original de desbalance.	55
Figura 6-25. Instalación del peso prueba.	56
Figura 6-26. Gráfico vector respuesta total.	57
Figura 6-27. Trazado resultante vector C.	58
Figura 6-28. Traslado al origen vector C.	58
Figura 6-29. Rotación de C hasta -O.	59
Figura 6-30. Retiro del peso prueba e instalación del peso de corrección.	60
Figura 6-31. Vibraciones directas y 1X del equipo después del balanceo.	61
Figura 6-32. Triángulo oblicuángulo con etiquetas.	62
Figura 6-33. Triangulo generado con vectores del proceso de balanceo.	62
Figura 6-34. Ángulo OT dependiendo de la ubicación de vectores en el plano polar.	64
Figura 6-35. Obtención de dirección de vector C en caso A.	65
Figura 6-36. Obtención de dirección de vector C en caso B.	66
Figura 6-37. Esquema División de peso.	67

Figura 6-38. Grado de calidad de balanceo en maquinaria típica	72
Figura 6-39. Carta de Desbalance específico residual basado en el grado de calidad y velocidad.	73
Figura 6-40. Resultados pregunta 1.	77
Figura 6-41. Resultados pregunta 2.	78
Figura 6-42. Resultados pregunta 3.	78
Figura 6-43. Resultados pregunta 4.	79
Figura 6-44. Resultados pregunta 5.	79
Figura 6-45. Resultados pregunta 6.	80
Figura 6-46. Resultados pregunta 7.	81
Figura 6-47. Resultados pregunta 8.	81
Figura 6-48. Respuesta pregunta 9.	82
Figura 6-49. Respuesta pregunta 10.	82
Figura 6-50. Respuestas pregunta 11.	83
Figura 6-51. Diagrama de flujo interfaz principal.	85
Figura 6-52. Diagrama de flujo módulo de balanceo primera parte.	86
Figura 6-53. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte A.	87
Figura 6-54. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte B.	88
Figura 6-55. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte C.	89
Figura 6-56. Diagrama de flujo módulo de división de pesos.	90
Figura 6-57. Diagrama de flujo módulo de verificación.	91
Figura 6-58. Boceto ventana principal.	93
Figura 6-59. Resultado de ventana principal.	93
Figura 6-60. Boceto interfaz módulo balanceo.	94
Figura 6-61. Resultado interfaz módulo de balanceo.	94

Figura 6-62. Boceto panel 1 en etapa 1 del módulo de balanceo.	95
Figura 6-63. Resultado final panel 1 en etapa 1 del módulo de balanceo.	95
Figura 6-64. Boceto panel 1 en etapa 2 del módulo de balanceo.	96
Figura 6-65. Resultado final panel 1 en etapa 2 del módulo de balanceo.	96
Figura 6-66. Boceto panel 1 etapa 3 del módulo de balanceo.	97
Figura 6-67. Resultado final panel 1 etapa 3 del módulo de balanceo.	97
Figura 6-68. Boceto Módulo de división de peso.	98
Figura 6-69. Resultado final módulo de división de peso.	98
Figura 6-70. Boceto Módulo de verificación.	99
Figura 6-71. Resultado final módulo de verificación.	99
Figura 6-72. Ingreso de información general del proceso al módulo.	101
Figura 6-73. Ingreso de amplitud y dirección del vector original.	101
Figura 6-74. Ingreso peso de calibración y vector total.	102
Figura 6-75. Resultados prueba módulo de balanceo.	103
Figura 6-76. Informe balanceo .pdf.	104
Figura 6-77. Resultado peso de corrección- Prueba 1 <i>rotorkit</i>	106
Figura 6-78. Resultado peso de corrección- Prueba 2 <i>rotorkit</i>	107
Figura 6-79. Ingreso de datos prueba módulo de división.	108
Figura 6-80. Resultados prueba módulo de división.	109
Figura 6-81. Informe módulo de división .pdf.	110
Figura 6-82. Ingreso de datos en módulo de verificación.	111
Figura 6-83. Resultados prueba de módulo de verificación.	112
Figura 6-84. Informe módulo de verificación .pdf.	113
Figura 6-85. Amplitudes directas antes del balanceo.	115

Figura 6-86. Ingreso de información general del motoventilador.....	115
Figura 6-87. Ingreso del vector original	116
Figura 6-88. Resultado peso de corrección y dirección.....	117
Figura 6-89. Resultados vibraciones directas después del proceso de balanceo.	118
Figura 6-90. Ingreso de datos verificación proceso de balanceo.	119
Figura 6-91. Resultados de verificación proceso de balanceo con ISO 21940. ..	119
Figura 6-92. Estado cambio de cojinetes ANTES de implementación de monitoreo y software balanceo.	121
Figura 6-93. Estado cambio de cojinetes CON implementación de monitoreo, pero NO software balanceo.....	122
Figura 6-94. Estado cambio de cojinetes CON implementación de monitoreo y software balanceo.	123
Figura 7-1. Análisis DOFA Empresa SIGA SAS.....	124
Figura 7-2. Análisis DOFA Personal.....	127
Figura 8-1. Implementación del módulo de balanceo en la plataforma de la empresa en base al aplicativo desarrollado.	130

INTRODUCCIÓN

El balanceo de rotores constituye un proceso esencial en el mantenimiento predictivo de máquinas rotativas, ya que contribuye a reducir los niveles de vibración, extender la vida útil de los equipos y prevenir fallas prematuras. Este procedimiento en algunas ocasiones se lleva a cabo de forma manual y/o empírica, lo que puede derivar en imprecisiones y comprometer la eficacia del mantenimiento. Frente a esta situación, surge la necesidad de desarrollar herramientas tecnológicas que optimicen el balanceo de rotores, asegurando mayor precisión y confiabilidad en los resultados.

En este contexto, el presente proyecto tiene como propósito diseñar una aplicación de escritorio que automatice el balanceo de rotores rígidos en un plano, empleando análisis vectorial y de vibraciones. Esta herramienta busca sustituir los métodos tradicionales, incrementando la eficiencia del mantenimiento y facilitando a los técnicos de la empresa SIGA S.A.S. la interpretación de los datos obtenidos.

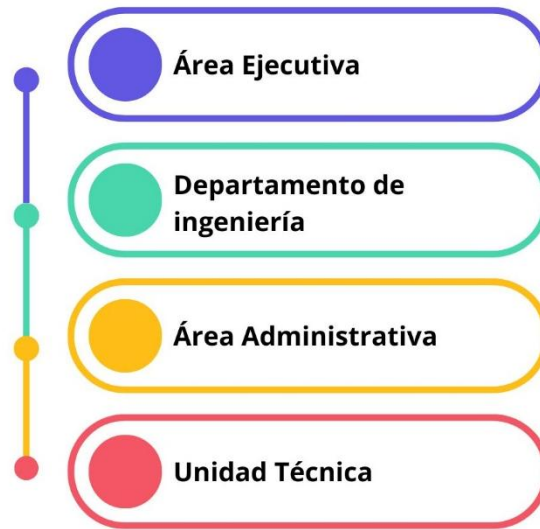
El documento se organiza en varios capítulos que detallan de manera integral el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se expone el marco teórico, donde se abordan los conceptos fundamentales relacionados con el balanceo de rotores, las vibraciones mecánicas y los principios del análisis vectorial aplicados a este proceso. A continuación, se describe la metodología empleada para el desarrollo de la aplicación, especificando las herramientas tecnológicas utilizadas y el enfoque adoptado en la programación del algoritmo.

Posteriormente, se presenta el desarrollo de la aplicación, abarcando tanto la implementación del *frontend* como del *backend*, así como las pruebas realizadas para validar su desempeño en condiciones reales. Por último, se incluyen las conclusiones y recomendaciones derivadas del proyecto, destacando su impacto en la optimización del mantenimiento predictivo y sugiriendo posibles mejoras futuras para ampliar su alcance y funcionalidad.

1. PERFIL DE LA EMPRESA

SIGA SAS es una empresa colombiana con presencia en Colombia y Estados Unidos, especializada en el mantenimiento predictivo de maquinaria para el sector *oil & gas*. Su estructura organizacional se compone de cinco divisiones principales, descritas a continuación.

- **Área ejecutiva:** Responsable de la toma de decisiones estratégicas, la gestión general de la empresa, y relaciones con los clientes liderada por el *CEO*, quien dirige desde la gerencia técnica de proyectos, seguido por el gerente administrativo y legal.
- **Departamento de ingeniería:** Integrado por especialistas en ingeniería mecánica, electrónica y metalúrgica, encargados del análisis en áreas como vibraciones, termografía infrarroja, evaluación dinámica y ensayos no destructivos, entre otras. Además, lideran y desarrollan proyectos de mantenimiento, montaje de maquinaria e innovación tecnológica.
- **Área administrativa:** Esta división es responsable de la coordinación, de los servicios ofrecidos por la empresa. Además, se encarga del control contable y financiero, supervisando los ingresos, egresos y demás aspectos administrativos que garantizan la estabilidad económica y operativa de la compañía.
- **Unidad técnica:** Conformada por técnicos especializados en mecánica y electrónica, cuya función principal es brindar soporte al departamento de ingeniería en la ejecución y desarrollo de proyectos, garantizando su correcta implementación y operatividad.

Figura 1-1. Estructura organizacional empresa SIGA SAS.

Gran parte de los clientes de SIGA pertenecen a la industria **Oil & Gas** y al sector de generación de energía, donde es fundamental implementar planes de mantenimiento basados en confiabilidad para sus equipos críticos. SIGA ofrece soluciones y servicios que garantizan seguridad y eficiencia operativa, minimizando riesgos y optimizando el desempeño de la maquinaria. Los principales servicios que ofrece y ejecuta incluyen:

- Monitoreo de vibraciones en línea
- Análisis dinámico de rotores por vibraciones
- Medición de vibraciones torsionales
- Evaluación de la confiabilidad de sistemas de monitoreo
- Alineación de maquinaria
- Balanceo de rotores
- Inspecciones visuales remotas (videoscopias)
- Termografía infrarroja
- Ensayos no destructivos
- Montaje de maquinaria industrial
- Mantenimiento programado y correctivo de equipos rotativos

Para la ejecución de los servicios mencionados, SIGA dispone de un equipo altamente capacitado y de tecnología especializada, incluyendo analizadores de vibraciones, *TorqueTrack*, *Rotalign*, cámaras infrarrojas, entre otros instrumentos y tecnologías.

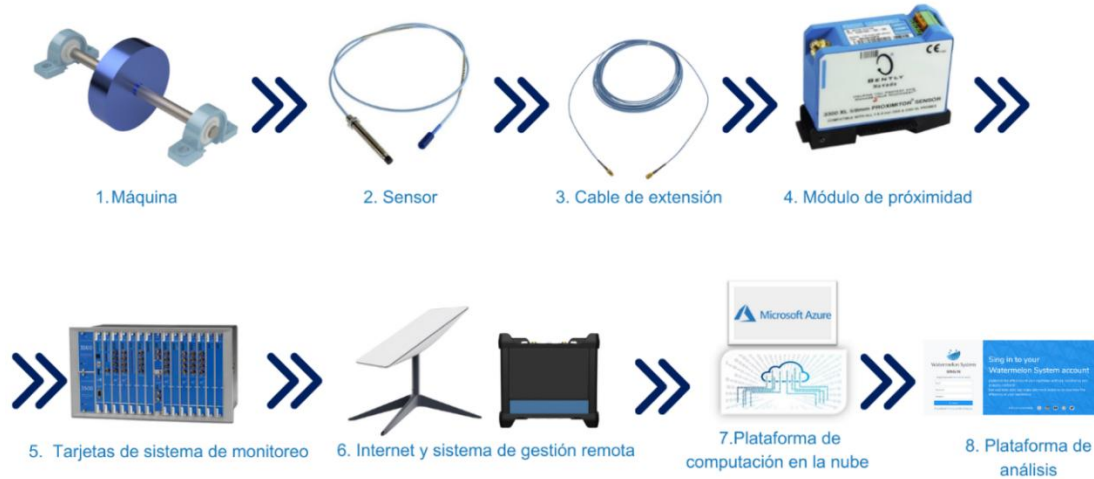
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Servicios Integrales en Gestión de Activos S.A.S. (SIGA) es una empresa de ingeniería que se especializa en brindar soluciones diseñadas para mejorar de manera progresiva la disponibilidad de equipos. Con un enfoque centrado en la gestión de activos y la integración inteligente de tecnologías, SIGA busca optimizar la producción y aumentar los beneficios económicos de sus clientes. Su visión se basa en ofrecer un servicio integral que no solo aumente la eficiencia operativa, sino que también garantice la seguridad en cada proceso industrial que gestionan.

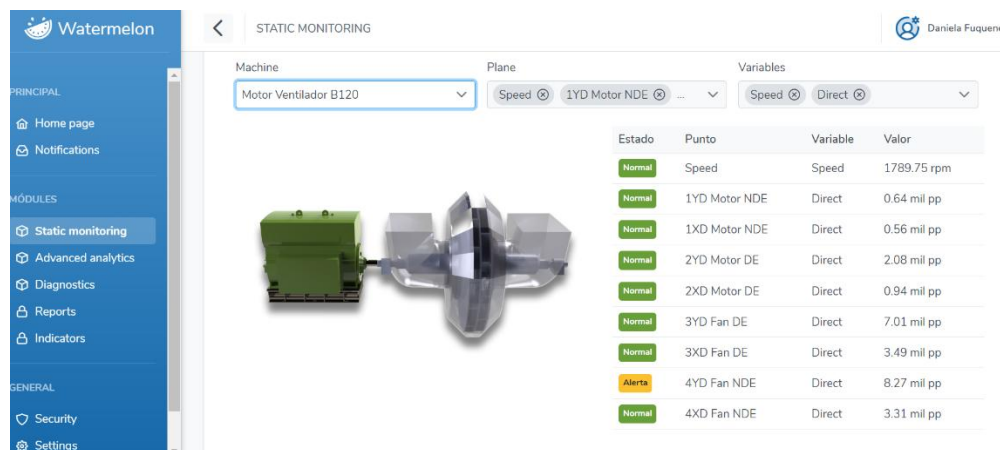
Para lograr estos objetivos, SIGA implementa estrategias basadas en el mantenimiento predictivo, el mantenimiento mecánico y el monitoreo en línea de vibraciones. Estas prácticas permiten una mayor confiabilidad y disponibilidad de los equipos, lo que se traduce en operaciones más estables y seguras. Al utilizar tecnologías avanzadas y una metodología enfocada en el rendimiento a largo plazo, de este modo la empresa ayuda a maximizar la productividad y el retorno de inversión para sus clientes.[1]

El monitoreo en línea de vibraciones es el servicio más reciente ofrecido por la empresa SIGA, dirigido principalmente a los sectores de *Oil & Gas* y agroindustrial. Este servicio consiste en proteger los equipos mediante el seguimiento de vibraciones, ya sean relativas o absolutas, y permite observar diferentes fenómenos de falla que puedan afectar el funcionamiento del equipo, los cuales son notificados al cliente por medio de informes semanales del equipo. El monitoreo se realiza de manera continua, las 24 horas del día, los 7 días de la semana, asegurando la protección constante de los equipos. Este proceso es completamente remoto, utilizando *hardware* y *software* especializados para transmitir las señales de vibración a la plataforma de análisis.

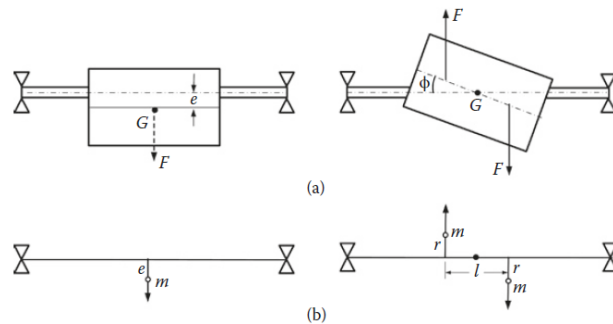
La **Figura 2-1** ilustra la metodología utilizada por la empresa SIGA para obtener las señales de vibración medidas mediante proximidad. En el primer paso, se instalan los sensores de proximidad (2), cumpliendo con los criterios establecidos por la norma *API 670*. Estos sensores están conectados a un cable de extensión (3), el cual proporciona la longitud necesaria para cumplir con los requisitos del *driver* o módulo de proximidad (4). El módulo de proximidad alimenta el sensor, generando un campo electromagnético entre la punta del sensor y la superficie del eje, el cual es directamente proporcional a la distancia entre ellos. [2] La señal generada por este campo se transmite a las tarjetas del sistema de monitoreo y/o protección (5), que se encargan de convertir la señal analógica en digital, permitiendo así observar las amplitudes de vibración en el plano. Los datos obtenidos por la tarjeta son encriptados y enviados a través de internet satelital y sistema de gestión remoto (6), el cual los transmite a la plataforma de computación en la nube (7). Una vez allí, los datos son descryptados y gestionados para ser enviados a la plataforma de análisis de vibraciones de la empresa, donde se realiza la evaluación correspondiente.

Figura 2-1. Metodología del sistema de monitoreo en línea para proximidad.

Uno de los equipos comúnmente monitoreados por SIGA son los moto-ventiladores (**Figura 2-2**), cuyo objetivo principal es mantener la temperatura adecuada en diversos procesos industriales. Debido a su función, estos equipos están expuestos a la acumulación de materiales particulados o al impacto de dichos materiales, lo que puede alterar la masa del rotor. Este cambio en la masa puede provocar un desbalance en el rotor, afectando su funcionamiento y la estabilidad del sistema.

Figura 2-2. Monitoreo en plataforma del motoventilador.

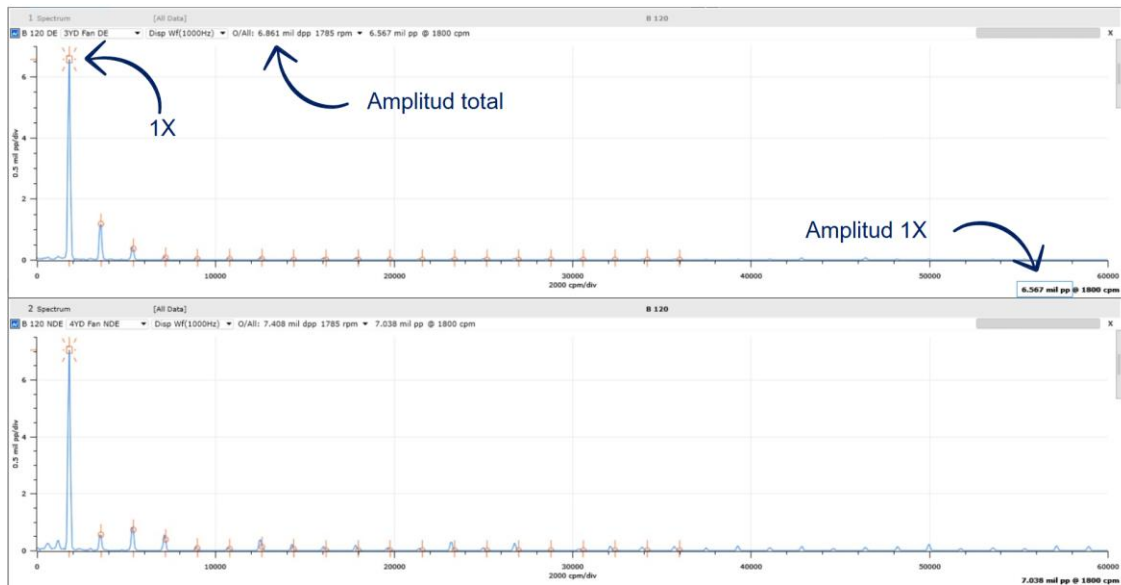
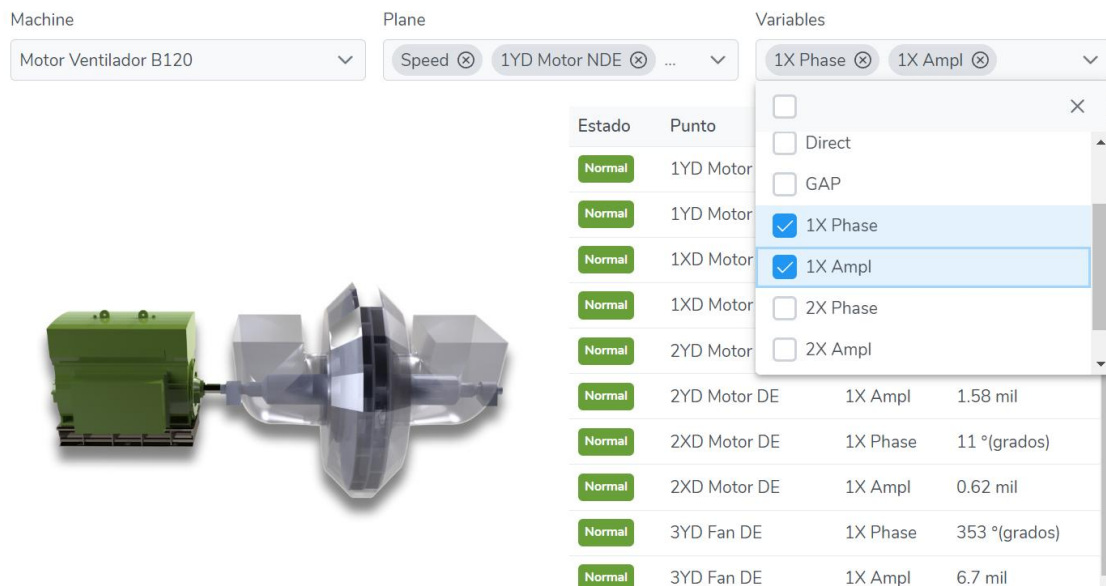
El desbalance ocurre cuando existe una excentricidad entre el centro de gravedad del rotor y el eje de rotación, lo que se conoce como desbalance estático (a). También puede originarse por una desalineación angular entre el eje principal del momento de inercia del rotor y el eje de rotación, o la línea central del eje, lo que se denomina desbalance de acoplamiento (b). Ambos tipos de desbalance pueden comprometer la eficiencia y seguridad operativa del equipo si no se monitorean y corrigen adecuadamente. [3]

Figura 2-3. Tipos de desbalance.

Fuente: TIWARI, Rajiv. Unbalances in Rigid and Flexible Rotors. En: ROTOR SYSTEMS: Analysis and Identification. Taylor & Francis Group, LLC, 2018. 707-708 p. [3]

El desbalance en el rotor provoca un aumento significativo en las vibraciones del equipo, superando en muchos casos los límites permisibles establecidos por la norma ISO 20816-3. [4] Este fenómeno se puede identificar a través del análisis de vibraciones utilizando diagramas como espectros (**Figura 2-4**), Bode y polar, siendo el análisis espectral el método más sencillo para su detección. Basado en la norma ISO 13373-1, el desbalance se manifiesta como una vibración predominante a una frecuencia característica de la velocidad de operación, conocida como **1X o frecuencia fundamental**. [5] Esta frecuencia debe ser claramente la mayor componente en comparación con otras presentes en el espectro. Además, es fundamental verificar si la vibración directa de la máquina excede o está sobre los límites permisibles establecidos en la norma ISO 20816. En algunos contextos, una frecuencia se considera predominante si su amplitud representa al menos el 70-80% de la vibración total, aunque esto puede variar según el tipo de máquina y las condiciones de operación.

La frecuencia fundamental 1X no solo es clave para diagnosticar el desbalance, sino que también permite corregirlo. A través de cálculos vectoriales y trigonométricos, es posible determinar el peso de corrección necesario para generar una fuerza centrífuga de igual magnitud, pero en dirección opuesta al desbalance. De esta manera, se contrarresta eficazmente el fenómeno.

Figura 2-4. Espectro ventilador, plano 3YD y 4YD.**Figura 2-5. Variable Amplitud 1X y fase.**

Para los equipos monitoreados en línea, es posible visualizar a través de la plataforma tanto los valores de vibración directos como la componente síncrona 1X (**Figura 2-5**), incluyendo la amplitud y la fase. La fase, que representa la posición relativa de un punto en un ciclo de onda en comparación con un punto de referencia (normalmente una chaveta), es de suma importancia para diagnosticar fenómenos como el desbalance y realizar el proceso de balanceo en el equipo. Sin embargo, actualmente no existe un aplicativo o herramienta que guíe este proceso y realice

los cálculos necesarios de forma automática. En la práctica, la empresa realiza los cálculos de balanceo de manera manual, utilizando diagramas polares impresos, mientras que algunos clientes emplean métodos experimentales y empíricos. Esto puede hacer que el proceso sea inexacto en muchos casos, afectando la precisión y efectividad del balanceo.

Este escenario plantea una pregunta crítica para mejorar el proceso de balanceo cuando se dispone de un analizador de vibraciones: ¿Es posible eliminar las prácticas inexactas en el balanceo de rotores rígidos en un plano y desarrollar un proceso más eficiente, preciso e intuitivo el cual se enfatice en dar la solución del desbalance como magnitud y ubicación del peso de corrección necesario para eliminar dicho fenómeno en el marco del servicio prestado por SIGA S.A.S.?

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una aplicación de escritorio con el lenguaje de programación Visual Basic con *.NET* mediante la plataforma Visual Studio que permita realizar el balanceo de rotores rígidos en un plano, utilizando el análisis vectorial y de vibraciones, con el propósito de reemplazar los métodos manuales y empíricos, y mejorar así la eficiencia del mantenimiento predictivo prestado por la empresa SIGA S.A.S.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el *FRONTEND* de la aplicación, que sea intuitiva y fácil de interpretar, facilitando el proceso de balanceo y brindado a la empresa SIGA S.A.S realizar el balanceo con mayor confianza y precisión.
- Desarrollar el *BACKEND* de la aplicación utilizando *Visual Studio*, que realice los cálculos del método vectorial para el balanceo en un plano de rotores rígidos.
- Realizar pruebas de la aplicación de escritorio en condiciones reales de operación, asegurando que cumpla con la calidad y los límites permisibles basados la norma ISO 21940.
- Realizar manual de usuario con el fin de explicar el correcto uso del programa.

4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo adecuado de la interfaz gráfica para el balanceo de rotores rígidos en un plano se estructura en cinco etapas, cada una diseñada para cumplir con los objetivos planteados de manera eficiente.

Figura 4-1 Metodología.



4.1. ETAPA 1: ANÁLISIS

Esta etapa se enfoca en un estudio detallado del proceso de balanceo por el método vectorial, a través de revisión bibliográfica. Seguido de la identificación y reconocimiento de las variables de entrada y salida de la aplicación, lo que permitirá establecer los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento y garantizar la efectividad del proceso de balanceo.

4.2. ETAPA 2: DISEÑO

Esta etapa se centra exclusivamente en el diseño del *FRONTEND* de la aplicación, abarcando aspectos como la elección de colores, tipos de letra y la distribución adecuada de las variables de entrada y salida. [6] El objetivo es crear una interfaz intuitiva y fácil de usar, que permita a los usuarios interactuar con la aplicación de manera fluida y eficiente. [7]

4.3. ETAPA 3: DESARROLLO

Seguido del diseño de *FRONTEND* se realiza la programación del *BACKEND* con el lenguaje Visual Basic por *.NET* en *Visual Studio*, esta etapa es crucial ya que el *BACKEND* es el encargado de la lógica de la aplicación y del procesamiento interno de los datos del aplicativo. [8]

4.4. ETAPA 4: PRUEBAS

En esta etapa, se llevarán a cabo diversas pruebas del código para verificar el correcto funcionamiento de la aplicación y asegurar que los resultados obtenidos sean efectivos. Esto se realizará en dos fases: en primer lugar, se llevará a cabo un ejercicio teórico basado en la bibliografía pertinente, y, en segundo lugar, se

realizarán pruebas operativas en laboratorio utilizando el *Rotor kit RK4*. Esta máquina simula el comportamiento real de un equipo rotativo, permitiendo evaluar las vibraciones bajo condiciones específicas, como desbalance e inestabilidades inducidas por fluidos, así como otros fallos provocados por el operador. Este enfoque integral garantizará que la aplicación funcione adecuadamente en situaciones prácticas.

Figura 4-2. Rotor kit RK4.



4.5. ETAPA 5: IMPLEMENTACIÓN

Por último, se procederá con el despliegue de la aplicación en un entorno real, donde se llevará a cabo el proceso de balanceo utilizando la herramienta desarrollada en los equipos de los clientes de SIGA S.A.S. Esta implementación permitirá validar la efectividad de la aplicación en condiciones operativas reales, asegurando que cumpla con los requisitos establecidos y que proporcione resultados efectivos.

5. MARCO NORMATIVO

Para el desarrollo del proyecto e informativo se tienen en cuenta principalmente 4 normas detalladas a continuación.

5.1. API 670 – SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE MAQUINARIA

La norma **API 670**, desarrollada por el **American Petroleum Institute (API)**, establece los lineamientos técnicos para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de monitoreo y protección de maquinaria crítica, especialmente en la industria del **petróleo, gas y generación de energía**. [1]

Esta normativa se centra en la detección temprana de condiciones anormales en equipos rotativos como **compresores, turbinas, bombas y generadores**, permitiendo la implementación de estrategias de mantenimiento proactivo. Entre sus principales especificaciones, API 670 establece:

- Requisitos para sensores de vibración, desplazamiento, temperatura y presión.
- Métodos de instalación y calibración de sistemas de protección.
- Procedimientos de alarma y parada de emergencia ante fallas inminentes.
- Integración de sistemas de monitoreo en tiempo real con controladores de maquinaria.

El cumplimiento de API 670 permite mejorar la seguridad operativa, reducir costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los activos industriales.

5.2. ISO 20816 – EVALUACIÓN DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS

La **ISO 20816** establece los criterios para la **medición, evaluación y clasificación de vibraciones en maquinaria rotativa**, proporcionando límites aceptables de vibración según el tipo de máquina y sus condiciones operativas. [9]

Esta norma reemplazó a la antigua **ISO 10816**, consolidando un enfoque más preciso en el análisis de vibraciones, con aplicaciones en industrias como **generación de energía, manufactura, petróleo y gas, y procesos industriales**. Entre sus principales aspectos destacan:

- Definición de umbrales de vibración permitidos según la potencia y tamaño del equipo.
- Clasificación de maquinaria según su diseño y montaje.

- Evaluación de vibraciones en condiciones de operación normal y transitoria.
- Métodos de medición y análisis de vibraciones en componentes críticos.

El cumplimiento de ISO 20816 facilita la identificación de fallos como **desbalanceo, desalineación, fallas en rodamientos y resonancia estructural**, permitiendo intervenciones oportunas y reduciendo riesgos de fallas catastróficas.

5.3. ISO 13373 – MONITOREO DE CONDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

La **ISO 13373** es una de las normativas más importantes en el mantenimiento predictivo, ya que establece los procedimientos para la adquisición, procesamiento e interpretación de datos de vibración en máquinas rotativas. [5]

Esta norma proporciona una metodología estandarizada para el análisis de vibraciones, abarcando aspectos como:

- Tipos de sensores y técnicas de medición.
- Procesamiento de señales de vibración y su conversión en información diagnóstica.
- Identificación de fallas mecánicas como desbalanceo, desalineación, rodamientos defectuosos y problemas en engranajes.
- Métodos para la implementación de programas de monitoreo de condición en la industria.

ISO 13373 es fundamental para empresas que buscan optimizar el mantenimiento de sus activos, mejorando la disponibilidad de equipos y minimizando costos asociados a paradas inesperadas.

5.4. ISO 21940 – BALANCEO DE ROTORES

La **ISO 21940** establece los procedimientos y criterios para el **balanceo de rotores** en equipos industriales, garantizando un funcionamiento estable y reduciendo vibraciones que puedan comprometer la seguridad o el rendimiento de la maquinaria. [10]

Sus principales aspectos incluyen:

- Definición de tolerancias de balanceo para distintos tipos de rotores.
- Métodos de corrección del desbalance mediante pesos de compensación.

- Procedimientos para la medición de desbalance en condiciones operativas y de prueba.
- Clasificación de niveles de calidad de balanceo para diferentes aplicaciones industriales.

El correcto cumplimiento de la ISO 21940 permite mejorar la vida útil de los componentes mecánicos, reducir el desgaste prematuro de rodamientos y optimizar la eficiencia energética de los equipos.

6. ACTIVIDADES REALIZADAS

La siguiente tabla presenta una descripción detallada de las principales actividades realizadas durante la pasantía en la empresa. La mayoría de estas tareas están directamente relacionadas con el desarrollo del proyecto asignado, mientras que otras, aunque no están enfocadas específicamente en dicho proyecto, están alineadas con el campo de la ingeniería mecánica y contribuyen al desarrollo profesional en esta área. Adicionalmente, las distintas etapas del desarrollo del aplicativo se explican en detalle en los capítulos siguientes.

Tabla 6-1. Cronograma de actividades.

SEMANA	DESDE	HASTA	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	OBJETIVO PROPUESTO
1	16-Nov-23	23-Nov-23	Inducción a la empresa (SIGA S.A.S). Familiarización de hardware y software de monitoreo en línea	Durante esta semana se lleva a cabo el proceso de inducción de la empresa, que incluye la familiarización con diversas políticas corporativas, tales como HSEQ (Salud, Seguridad, Medio Ambiente y Calidad), política seguridad vial, y desconexión laboral, entre otras. Además, se realiza la socialización del organigrama, así como la definición de roles y responsabilidades. Se lleva a cabo la familiarización con el hardware y software para el monitoreo en línea de vibraciones, explorando cada uno de los componentes que permiten transmitir las señales a cualquier parte de Colombia. Además, se realiza la socialización de la plataforma utilizada para el análisis de vibraciones, abarcando su uso y la generación de diferentes tipos de gráficas, entre otros aspectos	N/a

Tabla 6-2. Cronograma de actividades (cont.).

2	24-Nov-23	30-Nov-23	Inducción teoría vibracional básica y análisis de vibraciones de las máquinas monitoreadas	Durante estas semanas, se proporciona una inducción a la teoría vibracional básica, comenzando con una formación impartida por la empresa y seguida de una lectura autodidacta. Tras adquirir conocimientos sobre la teoría vibracional y el análisis de vibraciones, se procede a elaborar el primer informe de monitoreo en línea de vibraciones para cada una de las máquinas monitoreadas en ese momento.	Objetivo 2
3	1-Dic-23	9-Dic-23			
4	8-Dic-23	14-Dic-23	Mejoras de la plataforma del cliente, estructura, gráficos propuestos y demás	Se implementan cambios significativos en la organización de la plataforma para crear un entorno más amigable y fácil de usar para los clientes. Estas modificaciones están diseñadas para mejorar la experiencia del usuario al hacer que la plataforma sea más intuitiva en la navegación y accesible en la ubicación de funciones clave. Se optimiza el diseño visual para asegurar una estética agradable y coherente, promoviendo así una experiencia satisfactoria y eficiente.	N/a
5	15-Dic-23	21-Dic-23	Actualización de formato de reporte y control de consecutivo	Se realizan cambios en el formato de los reportes enviados semanalmente al cliente, diseñando un formato más sencillo de comprender, con menos limitación de espacio y una presentación más agradable a la vista. Estos ajustes buscan mejorar la claridad y accesibilidad de la información proporcionada, facilitando la interpretación de los datos por parte de los clientes. Además, se implementan modificaciones en los consecutivos de los reportes para establecer un registro único por cada equipo monitoreado. Este cambio permite un seguimiento más preciso y detallado del estado de cada equipo a lo largo del tiempo, mejorando la gestión de la información y la toma de decisiones basada en los datos recopilados.	N/a

Tabla 6-3. Cronograma de actividades (cont.).

6	22-Dic-23	28-Dic-23	Práctica de adecuación de hardware y software para el monitoreo en línea de vibraciones para el <i>Rotor kit</i> RK4	Se lleva a cabo la práctica de instalación, cableado y configuración del software para el monitoreo en línea en el laboratorio de la empresa, utilizando el <i>Rotor kit</i> Rk4. Esta etapa incluye la conexión de sensores y componentes necesarios, garantizando que el sistema esté correctamente instalado y configurado para capturar datos de vibración de manera precisa. Paralelamente, se realiza una lectura intensiva sobre adquisición de datos y teoría de análisis vibracional, comprendiendo las técnicas y metodologías para recoger e interpretar información relevante de los monitoreados.	Objetivo 1
7	29-Dic-23	4-Ene-24		Durante esta fase, se enfatiza la comprensión de cómo los datos de vibración reflejan el estado operativo de los equipos y se aplican procedimientos estandarizados para asegurar resultados consistentes y fiables. La práctica incluye la configuración de parámetros específicos del software, pruebas de funcionamiento y ajustes necesarios para asegurar el óptimo funcionamiento del sistema de monitoreo. Este proceso combina teoría y práctica, preparando al equipo para realizar diagnósticos precisos y tomar decisiones informadas basadas en los datos obtenidos.	
8	5-Ene-24	11-Ene-24	Teoría de balanceo en un plano para rotores rígidos	Esta semana se enfoca en el balanceo en un plano para rotores rígidos, explorando los métodos más comunes y el específico que se utiliza en la empresa. Se aborda el correcto diagnóstico de desbalance por vibraciones, asegurando una comprensión completa de los principios y prácticas involucradas.	Objetivo 1 y 2

Tabla 6-4. Cronograma de actividades (cont.).

9	12-Ene-24	18-Ene-24	Práctica de balanceo en un plano para rotores rígidos	Práctica de balanceo en un plano para rotores rígidos Se lleva a cabo una práctica utilizando el Rotor kit Rk4, aplicando el método gráfico de balanceo en un plano para rotores rígidos. Esta práctica permite aplicar los conocimientos teóricos adquiridos, facilitando una experiencia de aprendizaje integral que combina teoría y aplicación práctica.	Objetivo 1 y 2
10	19-Ene-24	25-Ene-24	Cálculo y análisis matemático del balanceo de rotores mediante el método gráfico vectorial	Durante estas semanas, se realizan los cálculos de manera manual evaluando los posibles escenarios de respuesta, los cálculos correspondientes a el vector de respuesta asociado exclusivamente al peso de calibración, la determinación del peso de corrección y su ubicación, así como la división del peso de corrección en función de la disponibilidad del rotor. Se desarrolla la lógica matemática con un enfoque en programación, incorporando estructuras condicionales para abordar distintos casos.	Objetivo 1 y 2
11	26-Ene-24	1-Feb-24			
12	2-Feb-24	8-Feb-24			
13	09-Feb-24	15-Feb-24	Diseño del prototipo del <i>frontend</i> de la aplicación	Durante esta semana se trabaja en la conceptualización del diseño del <i>frontend</i> , definiendo la estructura de las ventanas, la disposición de los paneles y su distribución. Además, se identifican las posibles variables de ingreso por parte del usuario y se establece un estilo visual inicial para la aplicación.	Objetivo 1

Tabla 6-5. Cronograma de actividades (cont.).

14	16-Feb-24	22-Feb-24	Programación de interfaz principal	Durante esta semana se lleva a cabo la programación de la interfaz principal de la aplicación a través de Visual Studio, en la cual se estructura la distribución de los tres módulos principales: el módulo de balanceo, el módulo de división de peso y el módulo de verificación del proceso de balanceo. Además, se desarrolla el menú de navegación inicial para facilitar el acceso a cada uno de estos módulos.	Objetivo 1
15	23-Feb-24	29-Feb-24	Desarrollo de la interfaz del módulo de balanceo	Durante esta semana se implementa la estructura de las ventanas y paneles del módulo de balanceo, tomando como referencia el prototipo diseñado en la semana 13. Se organizan y distribuyen los componentes gráficos esenciales para la interacción del usuario, incluyendo campos de entrada (<i>TextBox</i> , <i>ComboBox</i> , <i>ListBox</i>), elementos visuales (<i>PictureBox</i> , <i>Label</i>) y controles de acción (<i>Button</i>). En esta etapa, el desarrollo es exclusivamente visual, ya que aún no se ha incorporado la lógica de programación.	Objetivo 1
16	1-Mar-24	7-Mar-24	Implementación de la lógica del módulo de balanceo	Durante esta semana se desarrolla la programación lógica del módulo de balanceo, con excepción del diagrama polar. El sistema es capaz de calcular el peso de corrección y su ubicación óptima en función de los datos ingresados por el usuario, además de sugerir un valor adecuado para el peso de calibración, todo ello basado en la teoría previamente estudiada. Asimismo, se implementa la navegación entre paneles mediante la interacción con los botones de la interfaz.	Objetivo 2

Tabla 6-6. Cronograma de actividades (cont.).

17	8-Mar-24	16-Mar-24	Programación del gráfico polar del módulo de balanceo	Esta semana se centra en el desarrollo del diagrama polar, una representación visual clave para la interpretación del proceso de balanceo. Este gráfico permite visualizar los vectores resultantes, facilitando la comprensión del comportamiento dinámico del rotor. Además, proporciona al usuario una referencia clara sobre la ubicación del peso de corrección en relación con la posición del sensor, previamente definida al inicio del proceso. Esta funcionalidad contribuye a minimizar errores y confusiones en el posicionamiento del peso de corrección, mejorando la precisión del balanceo.	Objetivo 1
18	17-Mar-24	23-Mar-24	Desarrollo de la interfaz de módulo división de peso	Esta semana se desarrolla la interfaz (frontend) del módulo de división de peso, tomando como referencia el boceto o prototipo previamente elaborado. Durante este proceso, se definen los controles y elementos visuales que conformarán el módulo. Este módulo tiene la función de distribuir el peso de corrección según la disponibilidad de posiciones en el rotor, asegurando que la respuesta del sistema sea equivalente a la obtenida en la posición inicialmente no disponible.	Objetivo 1
19	24-Mar-24	30-Mar-24	Programación del módulo de división de peso	Una vez establecidos y ubicados los elementos visuales del módulo, se procede con la programación lógica, implementando la funcionalidad de los botones, el gráfico polar y los cálculos necesarios para obtener la respuesta de la división del peso.	Objetivo 2
20	31-Mar-24	06-Abr-24	Desarrollo de la interfaz de módulo verificación	El módulo de verificación tiene la función de calcular el desbalance residual del proceso de balanceo y determinar su efectividad según los criterios establecidos en la norma ISO 21940. Durante esta semana, se diseñan y organizan los elementos visuales y controles de la interfaz para garantizar una presentación clara y funcional.	Objetivo 1

Tabla 6-7. Cronograma de actividades (cont.).

21	07-Abr-24	13-Abr-- 24	Programación del módulo de verificación	En esta semana se programa la lógica de la interfaz programada en la semana 20, programando los cálculos necesarios y restricciones del módulo.	Objetivo 2
22	14-Abr-24	20-Abr-24	Pruebas y ajustes del aplicativo	Durante esta semana se llevan a cabo pruebas en el módulo de balanceo con el <i>Rotorkit</i> y ejemplo extraído de la teoría, para los dos módulos restante se realiza la prueba a través de ejemplo teórico para validar en ambos casos el correcto funcionamiento del aplicativo. Adicionalmente, se realizan ajustes en el diseño visual, incluyendo la modificación de tamaños, colores y la disposición de algunos elementos de la interfaz para mejorar la usabilidad y presentación del sistema.	Objetivo 3
23	21-Abr-24	27-Abr-24	Desarrollo del manual de usuario	Durante estas semanas se desarrolla el manual de usuario del aplicativo, detallando su funcionalidad, restricciones, alcance y las variables de ingreso, entre otros aspectos relevantes para su correcta utilización.	Objetivo 4
24	04-May-24	16-May-24			

6.1. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS

6.1.1. Balanceo

El desbalance, como se definió anteriormente, es la presencia de una masa excéntrica en un disco rotatorio (rotor), lo que provoca una fuerza centrífuga y genera vibración. Esto puede ser aceptable hasta cierto nivel, según el desbalance residual. Sin embargo, si la vibración causada por una masa desbalanceada no es aceptable, se puede corregir eliminando o agregando masa. Existen diferentes tipos de balanceo según el tipo de desbalance. En este caso, se abordará únicamente el desbalance estático, que ocurre cuando el centro de masa del rotor está desplazado con respecto al eje de rotación. (Vea **Figura 2-3**).

A continuación, algunos tipos de balanceo en un plano:

6.1.1.1. Balanceo estático

El balanceo estático se aplica a elementos de máquina delgados y circulares, como ventiladores, volantes o engranajes, cuyo centro de masa se ha desplazado del eje de rotación debido a errores de manufactura. Para detectar este desbalance, se monta el disco en una flecha sobre cojinetes de baja fricción, se gira y se deja detener varias veces, marcando con gis el punto más bajo en cada ocasión.

Si el disco está balanceado, las marcas aparecerán distribuidas al azar; si está desbalanceado, coincidirán en un mismo punto. Este desbalance se corrige eliminando material en la marca o agregando un peso a 180° de ella, utilizando un método de prueba y error, ya que la magnitud del desbalance es desconocida. [11]

6.1.1.2. Método de 4 corridas

Cuando no es posible medir el ángulo de fase, como en torres de enfriamiento, se puede utilizar el método de las cuatro corridas para balancear un rotor en un plano sin necesidad de esta medición. Este método es simple, permite un balanceo en sitio con precisión aceptable y requiere un mínimo de instrumentación, siendo suficiente un medidor de vibración, ya sea un sensor sísmico o un acelerómetro. [12]

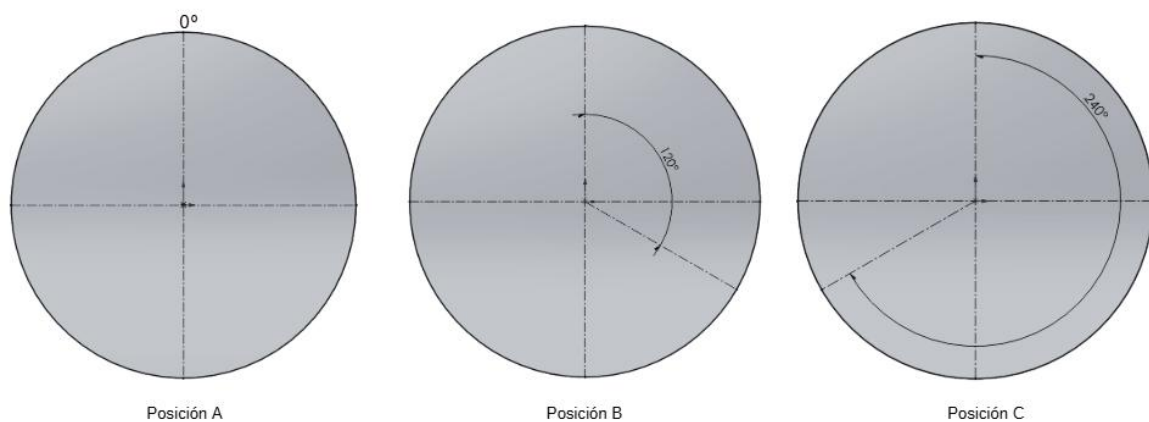
El método se basa en 4 corridas y se toma *solo la amplitud de vibración*, se define el peso de prueba como se muestra en la **Ecuación 6-1**. [13] También se definen 3 puntos de ubicación de este (A, B y C).

Ecuación 6-1. Peso de calibración (Método 4 corridas).

$$5\%PesoCal_{grs} = \frac{PesoRotor_{Kg}}{R_{cms}} * \left(\frac{2115}{RPM} \right)^2$$

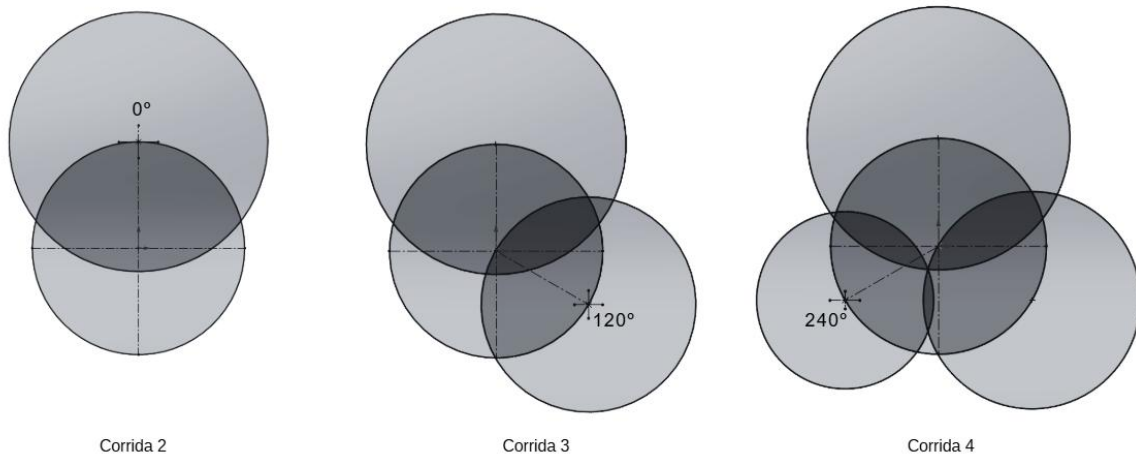
Después de definir la ubicación de los pesos, se realizan las corridas y la toma de datos con el medidor de vibraciones. La **primera corrida** representa la amplitud de vibración original y se realiza sin añadir peso. A partir de esta medición, se grafica una circunferencia cuyo diámetro corresponde a la amplitud hallada, estableciendo así el punto de partida para la construcción **del diagrama polar**. En esta primera circunferencia, se marcan las posiciones donde se colocará el peso de prueba (A, B y C).

Figura 6-1. Ejemplo Marcas de posiciones de peso prueba (Método 4 corridas).



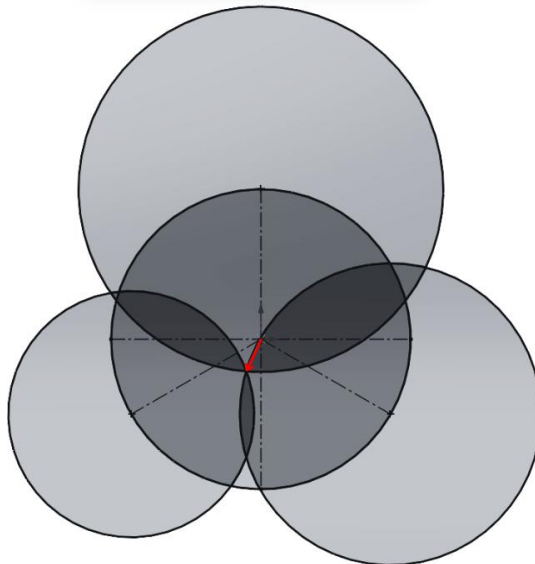
A partir de los puntos marcados previamente, se trazan circunferencias con las amplitudes obtenidas al colocar los pesos de prueba en cada una de las posiciones (A, B y C). De este modo, se llevan a cabo las **tres corridas restantes**.

Figura 6-2. Gráfico de resultado a peso prueba por corrida. (Método 4 corridas).



Las tres circunferencias trazadas se intersectan en un punto o área, determinando así la dirección y magnitud del peso de corrección. A partir de las amplitudes de vibración original y del vector resultante (trazado desde el origen hasta el punto de intersección), se calcula el factor de corrección, el cual se emplea para determinar el peso de corrección en función del peso de prueba utilizado. [13]

Figura 6-3. Vector resultante. (Método 4 corridas).



El peso de corrección también puede ser calculado analíticamente con las siguientes ecuaciones: [13]

Ecuación 6-2. Peso de corrección. (Método 4 corridas).

$$W_c = \frac{W_p}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

Ecuación 6-3. Angulo de Fase. (Método 4 corridas).

$$\theta = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right) + 180$$

y,

Ecuación 6-4. Componente X. (Método 4 corridas).

$$X = \frac{2P_1^2 - P_2^2 - P_3^2}{6 O^2}$$

Ecuación 6-5. Componente Y. (Método 4 corridas).

$$Y = \frac{P_2^2 - P_3^2}{3.4641 O^2}$$

Donde:

W_c : Peso de corrección

W_p : Peso de prueba

θ : Angulo fase

O : Magnitud de la vibración original

P_1, P_2 y P_3 : *Magnitudes de vibración en cada corrida*

6.1.1.3. Método gráfico con pesos de calibración

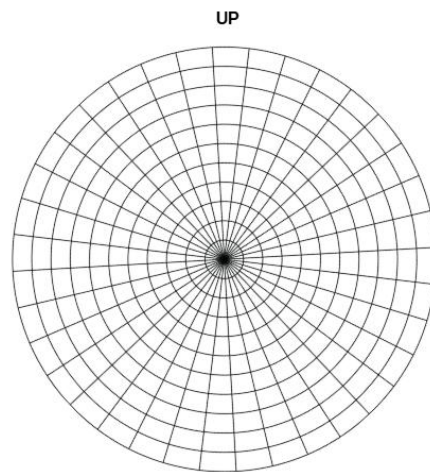
En este método se utilizan los datos de un solo transductor de vibración, incluyendo tanto la amplitud como la señal de fase por medio de un medidor de vibraciones, a diferencia del método anterior. Esta técnica puede aplicarse de forma gráfica o numérica, y se recomienda emplear ambas para minimizar errores, ya que cualquier

fallo en el procedimiento o en la introducción de datos podría ocasionar daños en el equipo. [14]

El método gráfico implica la manipulación de vectores de vibración y requiere el uso de papel milimetrado con coordenadas polares, lápiz, regla y dos escuadras para trazar líneas paralelas con precisión. El gráfico representa el plano de respuesta compleja del transductor, por lo que su correcta preparación debe considerar los siguientes aspectos: [14]

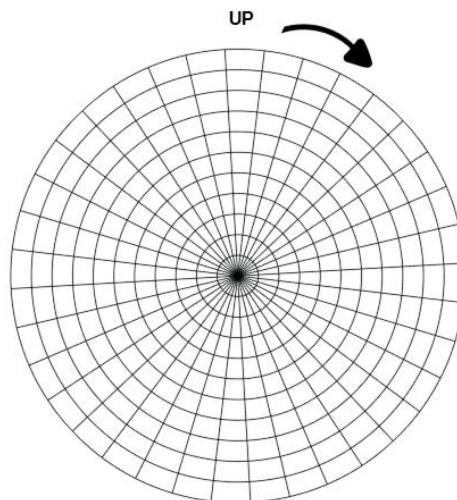
- Etiquetar la dirección de referencia externa de la máquina en la parte superior.

Figura 6-4. Dirección de referencia externa.



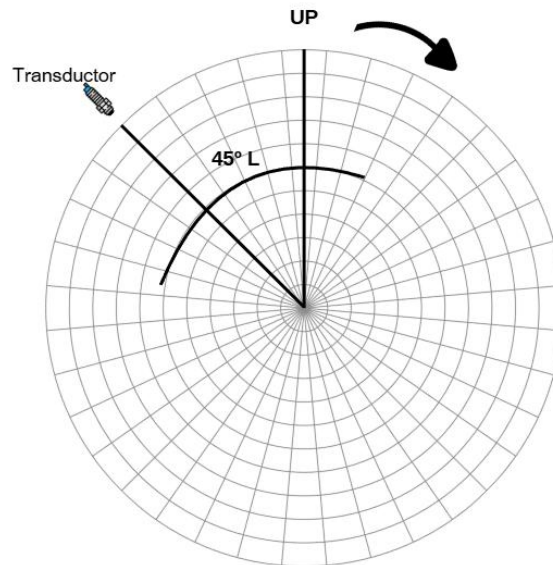
- Etiquetar el sentido de rotación de la máquina, visto siempre desde el equipo conductor al conducido.

Figura 6-5. Etiqueta sentido de rotación.



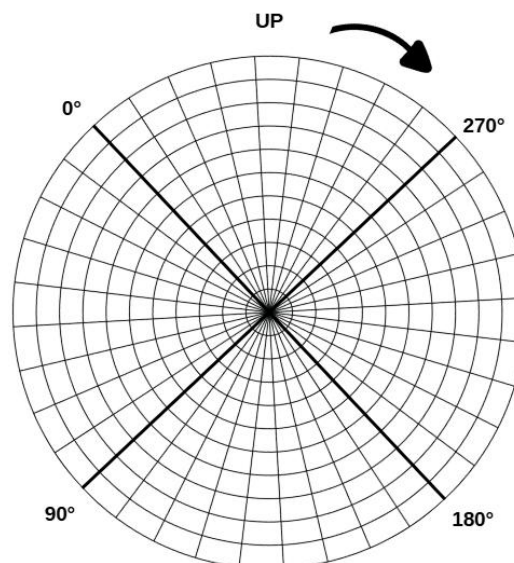
- Ubicar el transductor (sensor) en el ángulo correspondiente con respecto a la dirección de referencia externa etiquetada anteriormente.

Figura 6-6. Ubicación de transductor.



- Marque la referencia 0° en la ubicación del transductor, e indique los grados en el diagrama, incrementando en dirección opuesta a la de rotación. [14]

Figura 6-7. Referencia dada por el transductor.



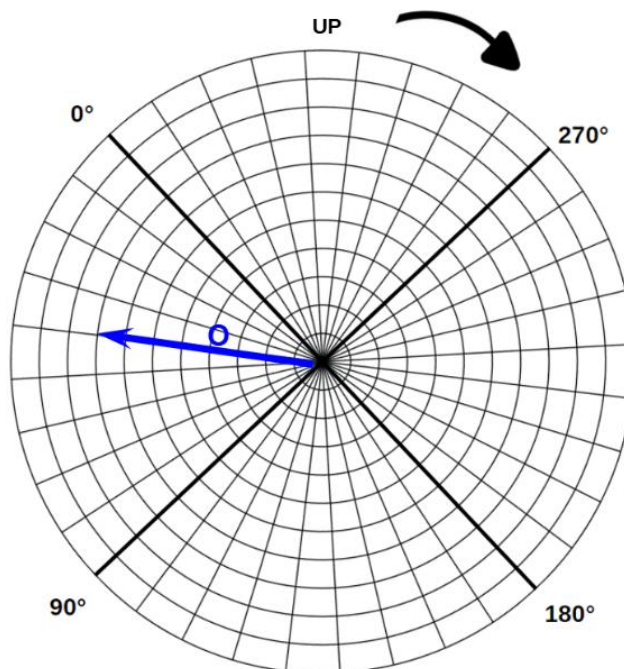
- Etiquete el gráfico con la velocidad del rotor y demás variables importantes de la máquina, que puedan afectar la repetibilidad de los datos. [14]

Una vez que el diagrama está correctamente identificado y etiquetado, se procede con el proceso de balanceo, el cual se desarrolla en los siguientes pasos:

➤ **Paso 1: Corrida del Vector Original ($\vec{O}$)**

Se da puesta en marcha al equipo hasta la velocidad de operación y se mide el vector original compensado a **1X**, el cual representa la vibración a la velocidad de operación causada por el desbalance desconocido en el equipo. Después de registrar el vector se apaga la máquina. Al graficar el vector, se debe establecer una escala adecuada, ya sea en centímetros o milímetros. Este vector se traza desde el origen del gráfico polar, donde su longitud corresponde a la amplitud de vibración obtenida del analizador de vibraciones, y su dirección, a la fase medida. [14]

Figura 6-8. Grafica de vector original.



➤ **Paso 2: Instalación del peso de calibración ($\vec{m_{cal}}$)**

Una vez apagada la máquina, se procede a instalar el peso de calibración, la masa de dicho peso se puede calcular por medio de la **Ecuación 6-6**, por regla conservadora y eficaz se debe instalar una cantidad de peso que genere una fuerza no mayor al 10% del peso del rotor, a la velocidad máxima de operación. [14]

Ecuación 6-6. Peso de calibración

$$F = mr_u\Omega^2 = 0.1W$$

$$m_{cal} = \frac{0.1W}{r_u\Omega^2} = \frac{0.1 Mg}{r_u\Omega^2}$$

Donde,

W : peso total del rotor (N o lb)

M : Masa del rotor (kg o $\text{lb} \frac{\text{s}^2}{\text{in}}$)

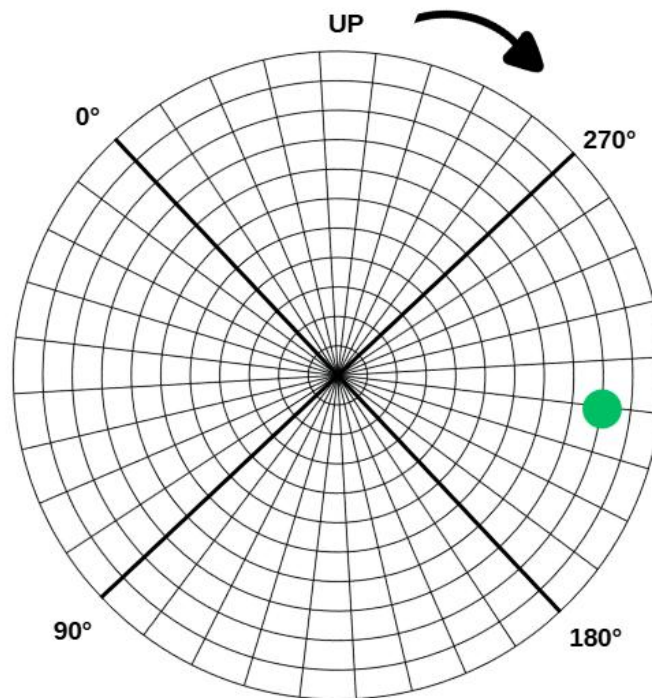
g : Gravedad

r_u : Radio de instalación del peso

Ω : Velocidad de giro

Instale el peso de calibración, preferiblemente en el punto opuesto al punto pesado del diagrama polar, y registre tanto su ubicación como su valor. Este peso actúa como un vector, ya que posee magnitud (su peso) y dirección (la posición angular en la que fue colocado).

Figura 6-9. Instalación del peso de calibración.



➤ **Paso 3: Vector de respuesta total ($\vec{T}$)**

Después de instalar el peso de calibración, se pone en marcha el equipo hasta alcanzar la misma velocidad de operación del paso 1. Se registran la amplitud y la fase del transductor, y luego se detiene la máquina. Esto permite obtener un nuevo vector que representa la respuesta combinada del peso de calibración y el desbalance original (**Ecuación 6-7**). Finalmente, este vector se grafica en el diagrama polar desde el origen, respetando la escala previamente establecida. [14]

Ecuación 6-7. Vector de respuesta total de la máquina.

$$\vec{T} = \vec{O} + \vec{C}$$

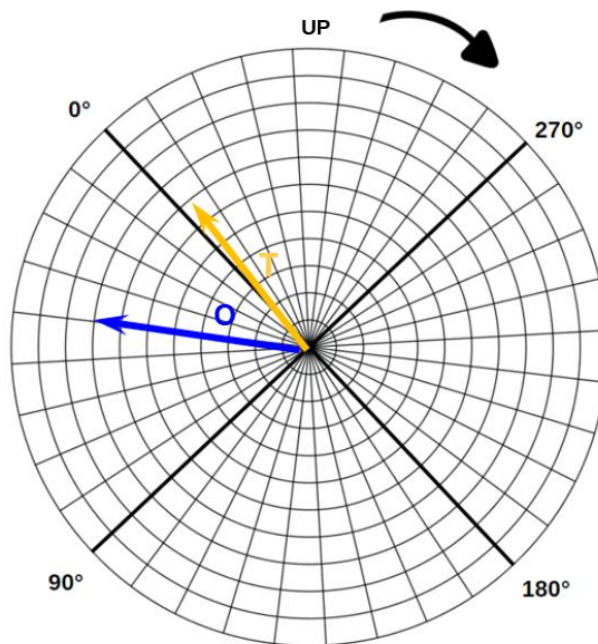
Donde,

$\vec{T}$: Vector de respuesta total

$\vec{O}$: Vector de desbalance original

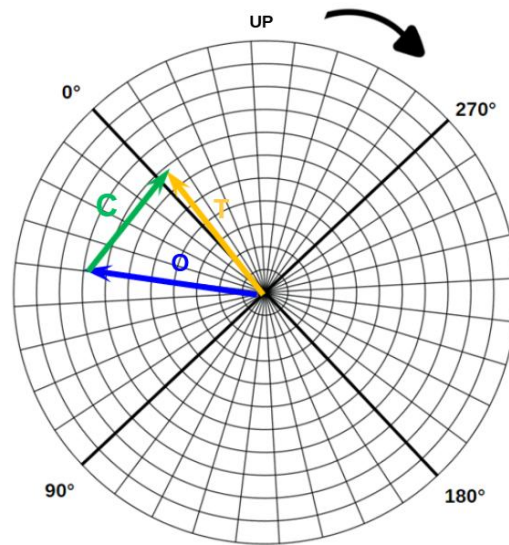
$\vec{C}$: Vector de respuesta debido a el peso de calibración.

Figura 6-10. Gráfico vector de respuesta total.



➤ **Paso 4: Vector de respuesta debido al peso de calibración ($\vec{C}$)**

Según la **Ecuación 6-7**, la respuesta generada exclusivamente por el peso de calibración instalado se obtiene restando la respuesta total del sistema y la respuesta del desbalance original. [14]

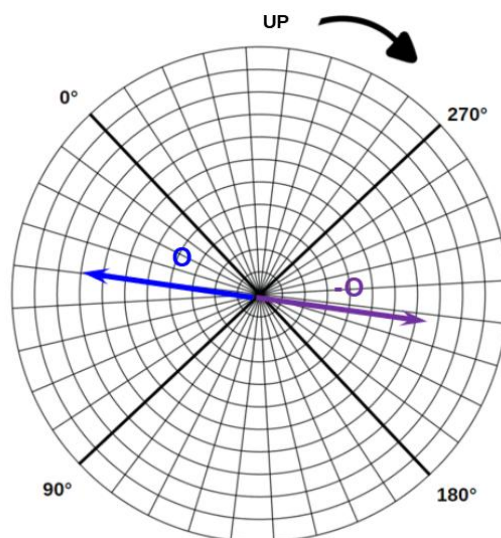
Figura 6-11. Resultante, respuesta debido al peso de calibración.

$\vec{C}$ se puede definir como:

Ecuación 6-8. Definición vector C

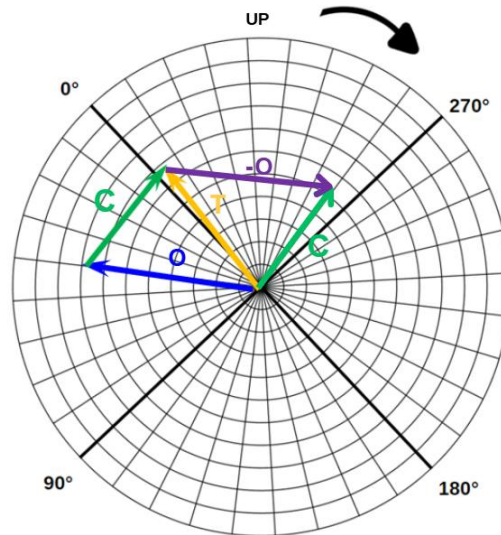
$$\vec{C} = \vec{T} - \vec{O} = \vec{T} + \overrightarrow{-O}$$

Donde $\overrightarrow{-O}$ corresponde al opuesto del vector original, el cual conserva su amplitud, pero su dirección cambia 180° .

Figura 6-12. Vector original opuesto.

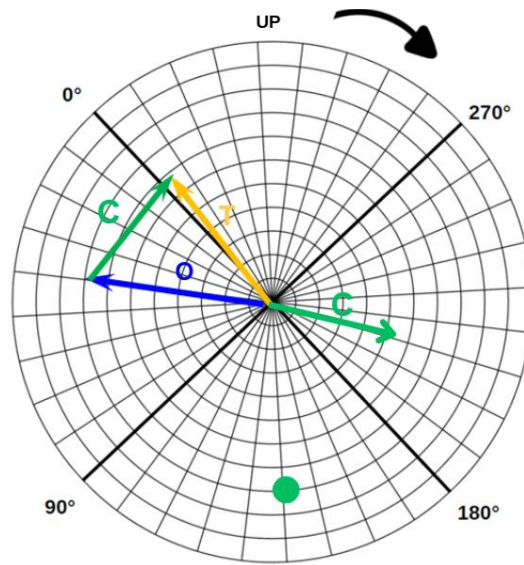
El vector $\vec{C}$ debe trasladarse al origen para determinar su dirección, mientras que su amplitud se obtiene midiendo su longitud en el gráfico. [14]

Figura 6-13. Traslado vector de respuesta al peso de calibración.



➤ **Paso 5: Rotación del vector ($\vec{C}$)**

El vector $\vec{C}$ debe rotarse hasta quedar en dirección opuesta al vector $\vec{O}$. Es importante considerar que m_{cal} y $\vec{C}$ están vinculados por la suposición de linealidad, lo que significa que, si $\vec{C}$ se rota a una nueva ubicación angular, m_{cal} también rotará en la misma dirección y con el mismo ángulo. Siguiendo este principio, m_{cal} debe rotarse en la misma medida que $\vec{C}$ y marcar su nueva ubicación en el gráfico. De este modo, un peso colocado en esta nueva posición generará una respuesta opuesta al desbalance original. [14]

Figura 6-14. Rotación vector C y peso de calibración.

➤ Paso 6: Tamaño peso de corrección

La ubicación hallada en el paso anterior corresponde a la ubicación en la cual se colocará el peso de corrección, para la magnitud, se aplica la siguiente ecuación: [14]

Ecuación 6-9. Tamaño peso de corrección.

$$|m| = \frac{|-O|}{|C|} |m_{cal}|$$

Se debe retirar el peso de calibración instalado en el paso 2, e instalar el nuevo de corrección, de este modo, se compensa el desbalance en el rotor.

Por otro lado, la dirección de este peso puede ser determinada utilizando los ángulos de fase en la siguiente ecuación:

Ecuación 6-10. Dirección peso de corrección.

$$\begin{aligned} \angle m &= (\angle O + 180^\circ) - \angle C + \angle m_{cal} \\ \angle m &= (\angle - O) - \angle C + \angle m_{cal} \end{aligned}$$

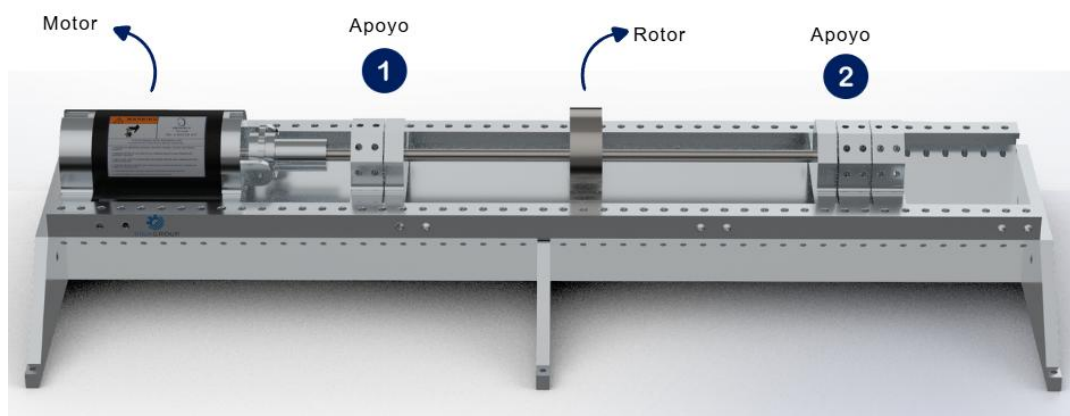
En la empresa Siga SAS, seleccionan el método gráfico como la principal técnica de balanceo para rotors rígidos con desbalance estático. Con el objetivo de comprender tanto el proceso como la teoría previamente expuesta, se lleva a cabo

una práctica de balanceo utilizando el Rotor kit RK4. Este equipo cuenta con un eje y un disco que actúa como rotor, y está conectado a un sistema de monitoreo de vibraciones en línea, que funciona como analizador de señales de vibración, en el cual se pueden observar las variables principales para el proceso (Amplitud 1X y Fase).

6.1.1.3.1. Práctica y resultado balanceo gráfico en *Rotor Kit RK4*

La **Figura 6-15** muestra el diseño CAD del equipo, que cuenta con un motor monofásico capaz de alcanzar hasta 10,000 rpm. Este motor cumple la función de impulsar la flecha, actuando como el equipo conductor. La flecha o eje está soportada por dos bujes, y junto a estos se encuentran dos soportes donde se instalan las sondas de proximidad, encargadas de captar la señal de vibración. En el centro de estos apoyos está instalado el rotor que cuenta con 16 agujeros distribuidos uniformemente para la instalación de pesos, este rotor actúa como el equipo conducido.

Figura 6-15. CAD Rotor kit RK4.



Antes de iniciar el procedimiento de balanceo, se debe identificar correctamente la ubicación y nomenclatura de los sensores. Esto permite evitar posibles daños en la máquina al prevenir la instalación de pesos en posiciones incorrectas. Según la norma *API 670*, capítulo 6, el número de planos aumenta desde el equipo conductor hacia el equipo conducido. En este caso, el apoyo más cercano al motor se denomina **plano 1**, y el siguiente, **plano 2**. La instrumentación utilizada en el equipo es de proximidad, la cual mide la posición relativa del eje mediante corrientes de Eddy. Conforme a la norma *API 670*, deben instalarse dos sensores ortogonales entre sí, es decir, con una separación de 90°. En este caso, los sensores están ubicados a 45° a la derecha e izquierda del centro vertical del eje. [2]

Figura 6-16. Probeta de proximidad.

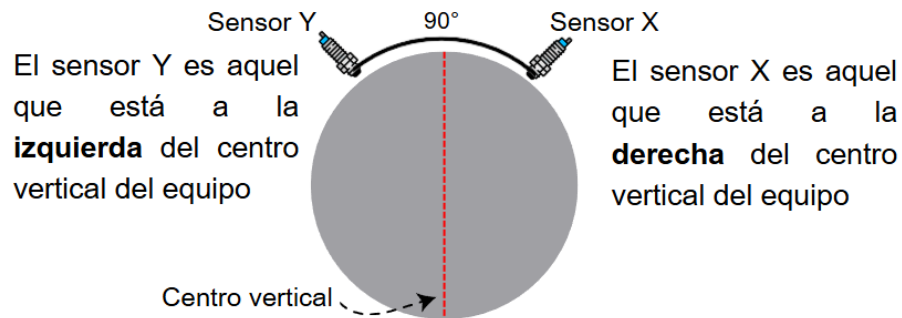


Fuente: VIVA INDUSTRIAL. Bently Nevada: Innovación en Monitoreo de Condición y Protección de Maquinaria. Joel Vilcherrez, 2025. [15]

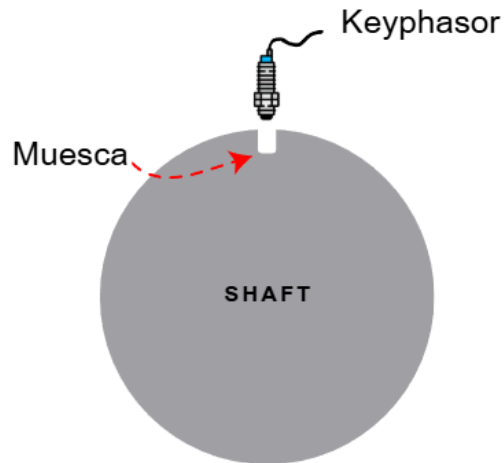
Figura 6-17. Probetas de proximidad rotor kit



Cada sensor tiene una referencia: si la sonda está situada a la izquierda del centro vertical del eje, se designa como "**Y**"; si está a la derecha, se designa como "**X**" (vea **Figura 6-18**). La nomenclatura de los sensores sigue un formato específico: primero, el número de plano; luego, la referencia del sensor (Y o X); después, la magnitud medida de vibración (**D** para desplazamiento, **V** para velocidad y **A** para aceleración); y, finalmente, se indica si el plano está libre o acoplado, utilizando las siglas **NDE** (Non-Drive End) y **DE** (Drive End), respectivamente. [2]

Figura 6-18. Referencia sensores.

Una vez identificadas las ubicaciones de los sensores, es necesario añadir una referencia externa además de la indicación de arriba o abajo en el plano polar. Comúnmente, se utiliza en este caso la chaveta del *keyphasor*, el sensor encargado de proporcionar la fase. De este modo, al alinear la chaveta con el *keyphasor*, se facilita una colocación más precisa de los pesos en rotores que no tienen agujeros referenciados o cuya visibilidad es limitada.

Figura 6-19. Referencia *keyphasor*.

En este caso, ya que en Rotor Kit no se encuentra desbalanceado, se agrega una masa de 7.7 gramos en una dirección aleatoria, con el fin de generarle desbalance y realizar la práctica.

Figura 6-20. Instalación y pesaje masa de desbalance.

Después de instalar la masa de desbalance, se pone en marcha el equipo a una velocidad de operación de **1800 rpm** para realizar la prueba y su sentido de giro corresponde a horario. En esta primera corrida, se verifica la presencia del fenómeno de desbalance mediante el análisis de los espectros de frecuencia. Tanto en el lado acople (plano 1) como en el lado libre (plano 2), se observa un incremento predominante de la frecuencia fundamental 1X, la cual representa más del 80% de la amplitud directa (**Figura 6-22**), confirmando así el desbalance. Además, se registran los valores de amplitud y dirección del desbalance original, determinado por la componente 1X cuando la velocidad es constante obteniendo así el primer vector $\vec{O}$. Finalmente, se apaga el equipo.

Figura 6-21. Vibraciones directas antes del balanceo.

Static monitoring

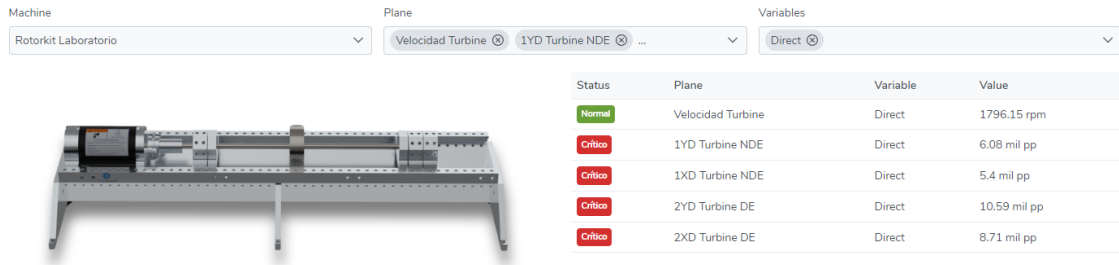
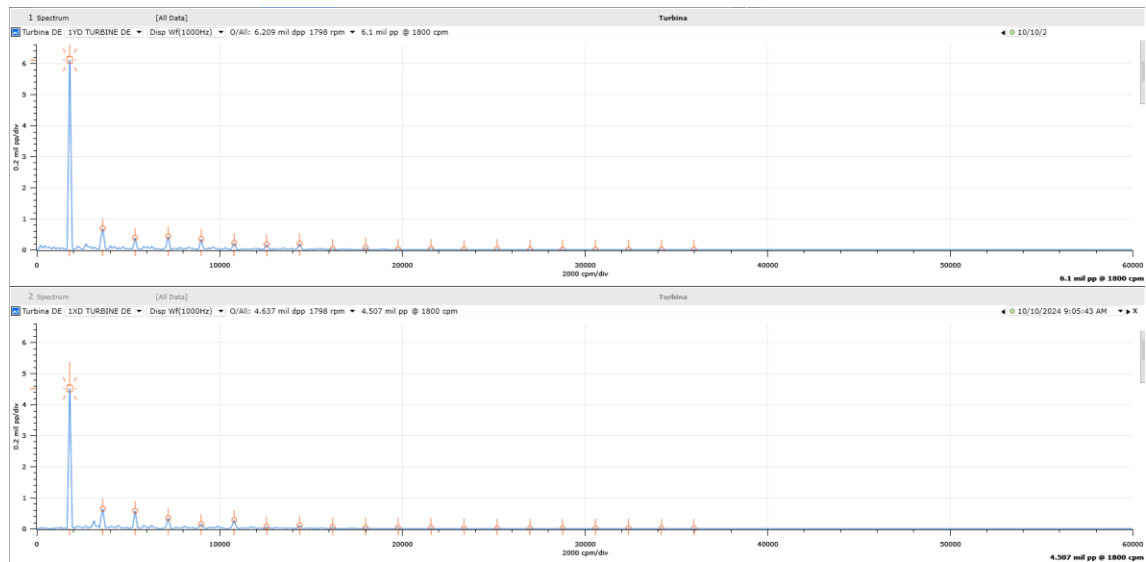
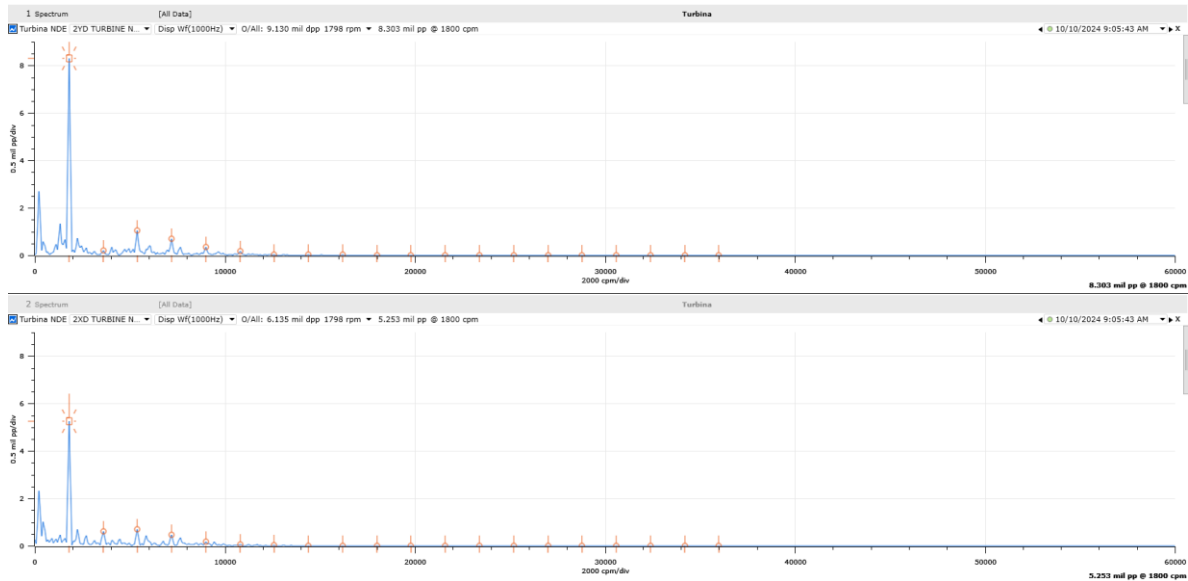
☒ Current values
 ☐ Historical
**Figura 6-22. Espectro de frecuencia lado acople.**

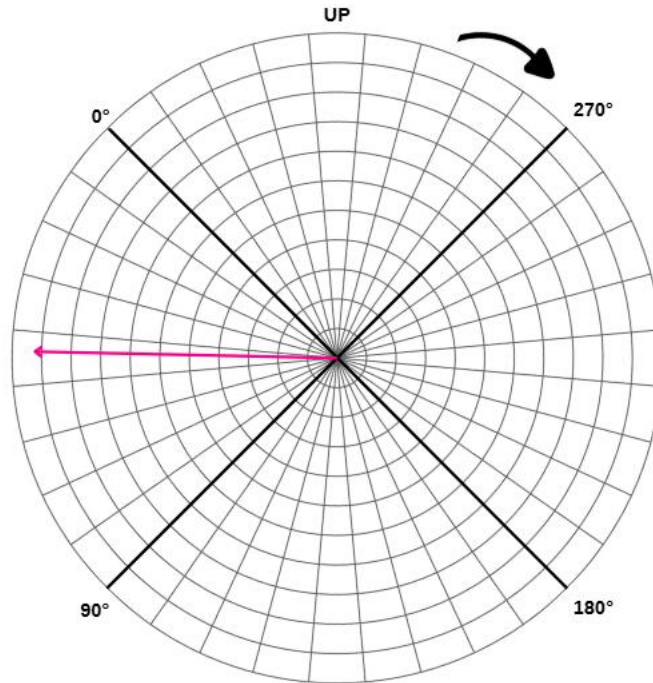
Figura 6-23. Espectro de frecuencia lado libre.**Tabla 6-8. Resultados primera corrida**

CORRIDA 1				
PLANO	Directa [mil pp]	Amplitud 1X [mil pp]	Fase 1X [°]	Componente [%]
1YD	6.08	6.06	61	99.671
1XD	5.4	4.53	118	83.889
2YD	10.59	8.08	44	76.110
2XD	8.71	5.38	163	61.768

Se selecciona el plano con la mayor amplitud, que en este caso corresponde a 2YD. Es fundamental tener en cuenta que, para las corridas restantes, los vectores se registrarán únicamente con las lecturas de este primer plano seleccionado. De este modo, se tiene que,

$$\vec{O} = 8.08 \text{ mil pp} \angle 44^\circ$$

Se procede a graficar el vector debido a la respuesta del desbalance original en el diagrama polar, previamente referenciado y preparado de acuerdo con las cinco recomendaciones mencionadas anteriormente, como se ilustra en la **Figura 6-24**.

Figura 6-24. Gráfica vector original de desbalance.

Una vez graficado el vector original, se determina el tamaño y la ubicación del peso de calibración. Considerando que el rotor tiene un peso de 800 g y que el radio disponible para la instalación del peso es de 3 cm, se aplica la **Ecuación 6-6** para obtener el valor correspondiente.

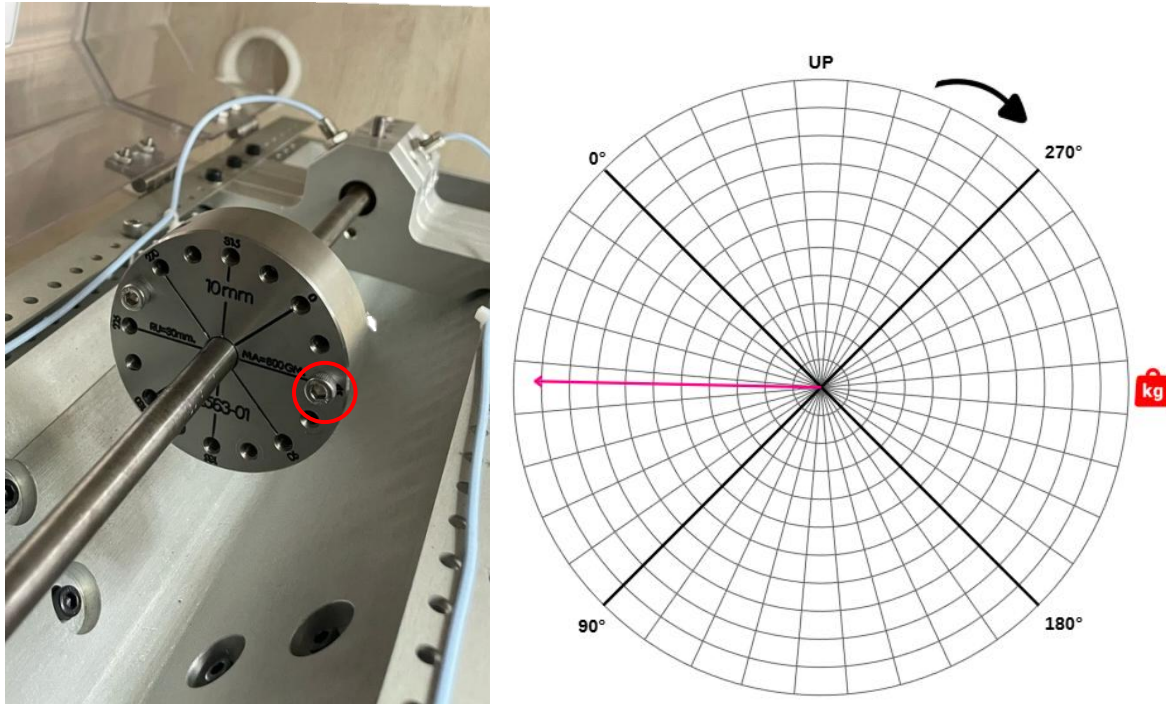
$$|m_{cal}| = \frac{0.1 (0.8 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2)}{(0.03 \text{ m}) \left[\left(1800 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(1 \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \right) \left(2\pi \frac{\text{rad}}{\text{rev}} \right) \right]^2}$$

$$|m_{cal}| = 0.736 * 10^{-3} \text{ kg} = 0.736 \text{ g}$$

Con el fin de generar una mayor excitación en el equipo, se decide aumentar el peso de calibración con respecto a lo sugerido por la ecuación anterior; se instala un peso de 1.6 g a 225°. La ubicación de este se define a 180° del vector original, En base a lo anterior se tiene que:

$$\blacksquare \overrightarrow{m_{cal}} = 1.6 \text{ g} \angle 225^\circ$$

Para ubicar correctamente el peso de calibración, se ubica la muesca en el *keyphasor* y se referencia el transductor 2YD, se cuentan los grados en sentido opuesto al de giro.

Figura 6-25. Instalación del peso prueba.

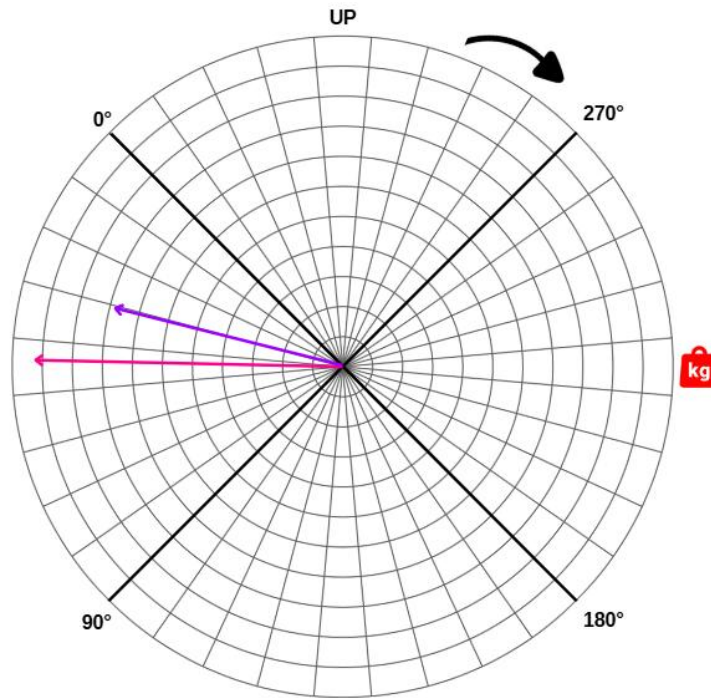
Después de instalar el peso de calibración en el rotor, se pone en marcha el equipo por segunda vez a la misma velocidad que en la corrida 1 y se registran los valores obtenidos en el mismo plano. Esta nueva respuesta corresponde a la combinación de la respuesta del desbalance original y la del peso instalado, es decir, representa el vector de respuesta total ($\vec{T}$).

Tabla 6-9. Resultados segunda corrida.

Plano	CORRIDA 2		
	Directa [mil pp]	Amplitud 1X [mil pp]	Fase 1X [°]
1YD	5.259	5.01	52
1XD	4.576	3.23	114
2YD	9.276	6.14	31
2XD	7.917	4.58	166

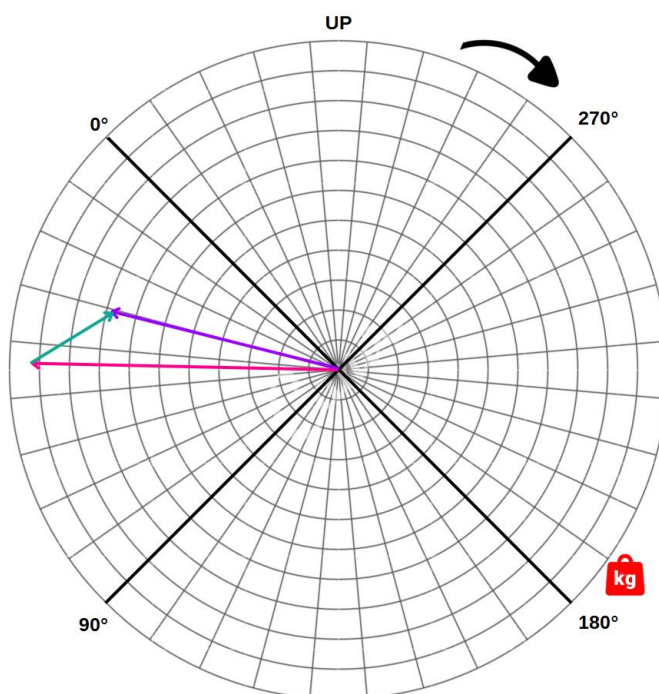
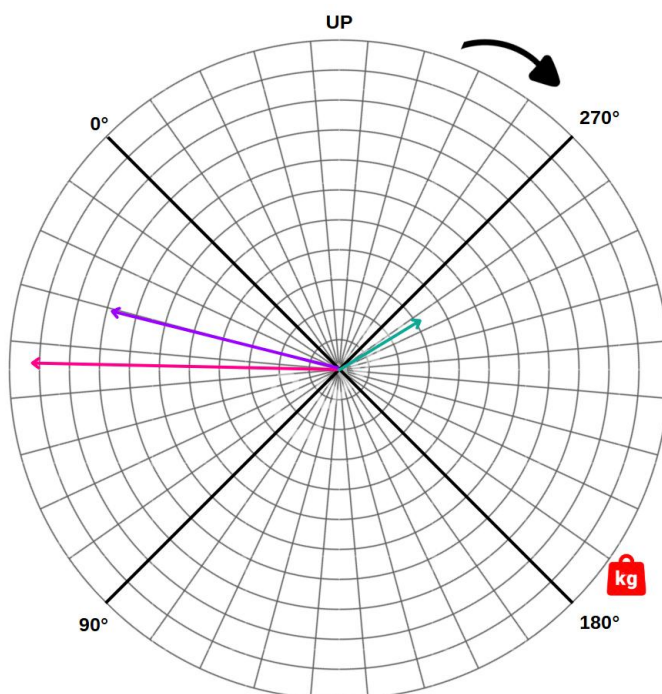
Con base a lo anterior, el vector de respuesta total está dado por:

$$\blacksquare \vec{T} = 6.14 \text{ mil pp } \angle 31^\circ$$

Figura 6-26. Gráfico vector respuesta total.

Una vez graficado, se traza la resultante de $\vec{T} - \vec{O}$ (**Figura 6-27**), de este modo se obtiene el vector $\vec{C}$, el cual hace referencia a la respuesta solamente del peso de calibración instalado. La longitud del vector equivale a la magnitud del mismo, para este caso, la magnitud es de 2.4 mil pp. Por medio de dos escuadras se traslada el vector al origen (**Figura 6-28**), de este modo se halla la dirección de este.

$$\blacksquare \vec{C} = 2.4 \text{ mil pp } \angle 257^\circ$$

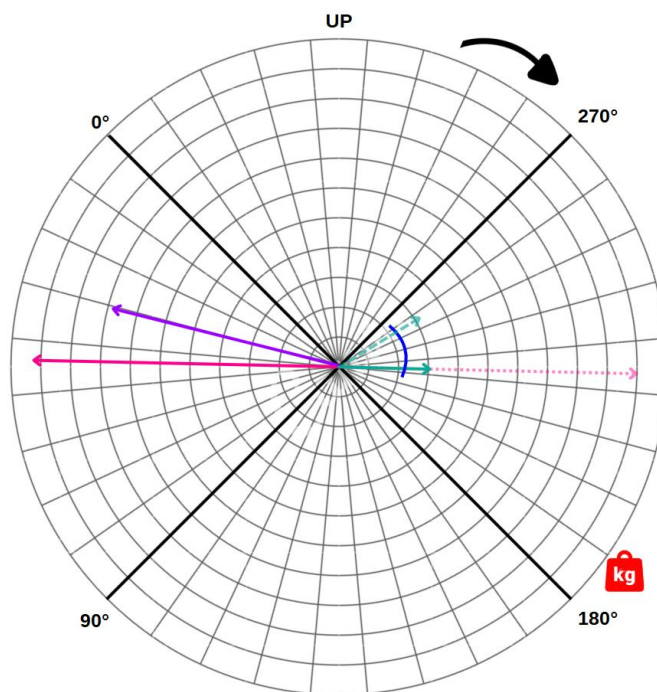
Figura 6-27. Trazado resultante vector C.**Figura 6-28. Traslado al origen vector C.**

Contando con la dirección original del vector $\vec{C}$, se rota con el fin de llegar a la dirección opuesta de la respuesta original $\vec{O}$, de este modo, se halla la nueva ubicación del peso, ya que este debe rotar los mismos grados y a la misma dirección que $\vec{C}$. Teniendo en cuenta que el vector opuesto a $\vec{O}$ se define como:

$$\vec{-O} = 8.08 \text{ mil pp } \angle 224^\circ$$

La rotación del vector $\vec{C}$ se ilustra en la siguiente figura.

Figura 6-29. Rotación de C hasta -O.



En este caso, el vector $\vec{C}$ tuvo que rotar 33° en sentido horario, esto se traduce en que la dirección del peso de corrección final tomaría un valor de 192° .

$$\angle m = 225^\circ - 33^\circ = 192^\circ$$

En cuando a la magnitud del peso de corrección, se calcula por medio de la **Ecuación 6-9**,

$$|m| = \frac{8.08}{2.4} * 1.6 \text{ g} = 5.38 \text{ g}$$

Una vez calculado el peso de corrección final, se retira el peso de calibración previamente instalado y se sustituye por el nuevo peso determinado. Debido a la disponibilidad de agujeros en el rotor, se coloca un peso de **5 g** a **180°**. Luego, se pone en marcha el equipo por tercera vez para verificar su respuesta al peso de corrección y confirmar la efectividad del balanceo. Los resultados de esta corrida se ilustran en la **Tabla 6-10**.

Figura 6-30. Retiro del peso prueba e instalación del peso de corrección.



Tabla 6-10. Resultados de balanceo.

CORRIDA 3			
Plano	Directa [mil pp]	Amplitud 1X [mil pp]	Fase 1X [°]
1YD	1.33	1.06	66
1XD	0.94	0.83	166
2YD	2.01	1.69	43
2XD	2.9	2.51	195

La amplitud directa en el plano 2YD, seleccionado para el balanceo, se redujo en 8.58 mil pp. Como resultado del proceso de balanceo, todas las amplitudes de vibración en los distintos planos se encuentran dentro de los límites admisibles. La **Tabla 6-11** muestra los cambios en los niveles de vibración en cada plano antes y después del balanceo, se obtuvo una disminución de hasta el 83%.

Figura 6-31. Vibraciones directas y 1X del equipo después del balanceo.

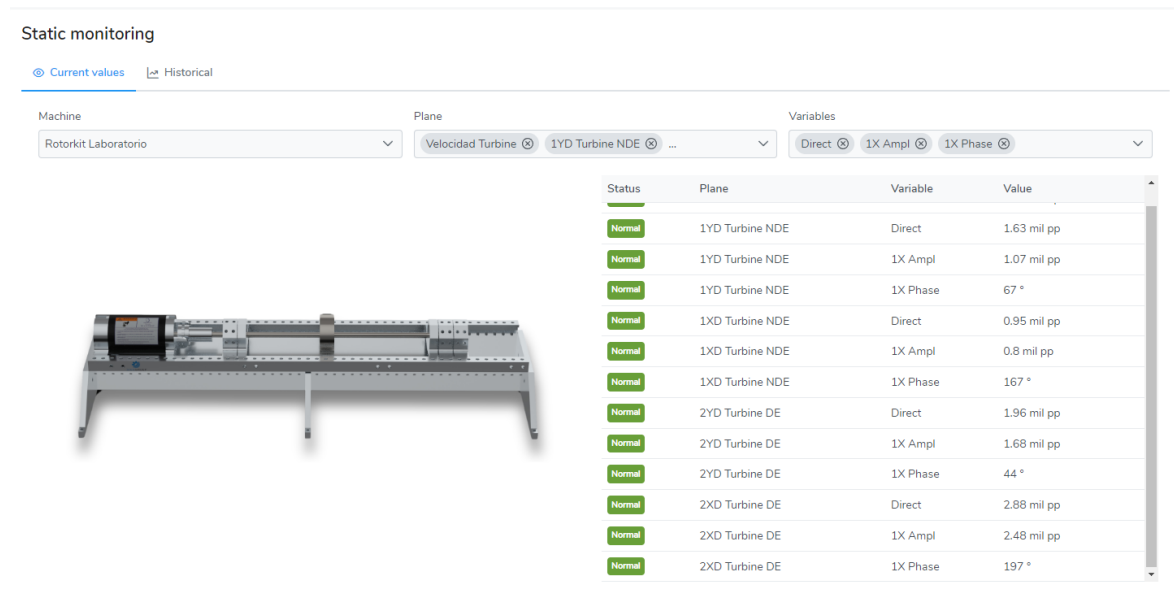


Tabla 6-11. Comparación amplitudes de vibraciones antes y después del proceso de balanceo.

Plano	Amplitud Directa [mil pp]			Amplitud filtrada 1X [mil pp]		
	Antes del balanceo	Después del balanceo	Disminución	Antes del balanceo	Después del balanceo	Disminución
1YD	6.08	1.33	-78%	6.06	1.06	-83%
1XD	5.4	0.94	-83%	4.53	0.83	-82%
2YD	10.59	2.01	-81%	8.06	1.69	-79%
2XD	8.71	2.9	-67%	5.38	2.51	-53%

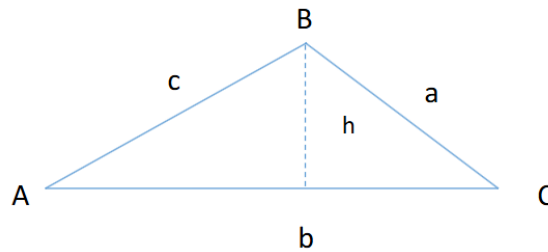
6.1.1.4. Análisis matemático del balanceo gráfico

Para alcanzar el objetivo del proyecto, es necesario transformar el método gráfico (geométrico) en un enfoque matemático. Para ello, se emplea la Ley de Cosenos, lo que permite prescindir de la descomposición de los vectores obtenidos del analizador de señales. [11] Dado que se conocen dos lados del triángulo y el ángulo que los une, [16] es posible calcular directamente las magnitudes requeridas. La Ley de Cosenos se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 6-11. Ley de cosenos.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos(A)$$

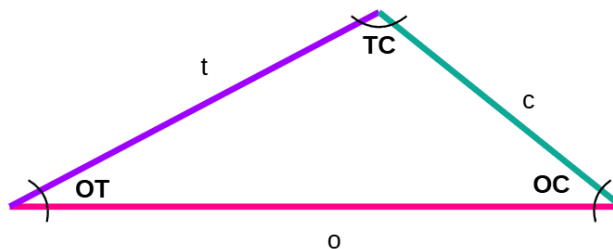
Figura 6-32. Triángulo oblicuángulo con etiquetas.



Fuente: Swokowski, E. W., & Cole, J. A. (2011). Álgebra y Trigonometría con Geometría Analítica. México, D. F.: Cengage Learning. [16]

En este caso, los lados representan la magnitud del vector obtenido del analizador de señales. Por otro lado, la nomenclatura de los ángulos se asigna en función de los lados que los conforman, por lo tanto, el triángulo definido por el proceso de balanceo corresponde a:

Figura 6-33. Triángulo generado con vectores del proceso de balanceo.



Donde:

o : Lado o , magnitud del vector de desbalance original.

t : Lado t , magnitud del vector total.

c : Lado c , magnitud del vector debido exclusivamente al peso de calibración.

OT : Ángulo entre el lado O y T .

TC : Ángulo entre el lado T y C .

OC : Ángulo entre el lado O y C .

Para hallar el peso de corrección es necesario conocer el lado c (magnitud de vector c), como se mencionaba en el primer informe, para ellos se aplicará la ley de cosenos, teniendo en cuenta que los lados t y o son conocidos, al igual que el ángulo OT , c está dado por:

Ecuación 6-12. Amplitud lado C

$$c = \sqrt{o^2 + t^2 - 2ot\cos(OT)}$$

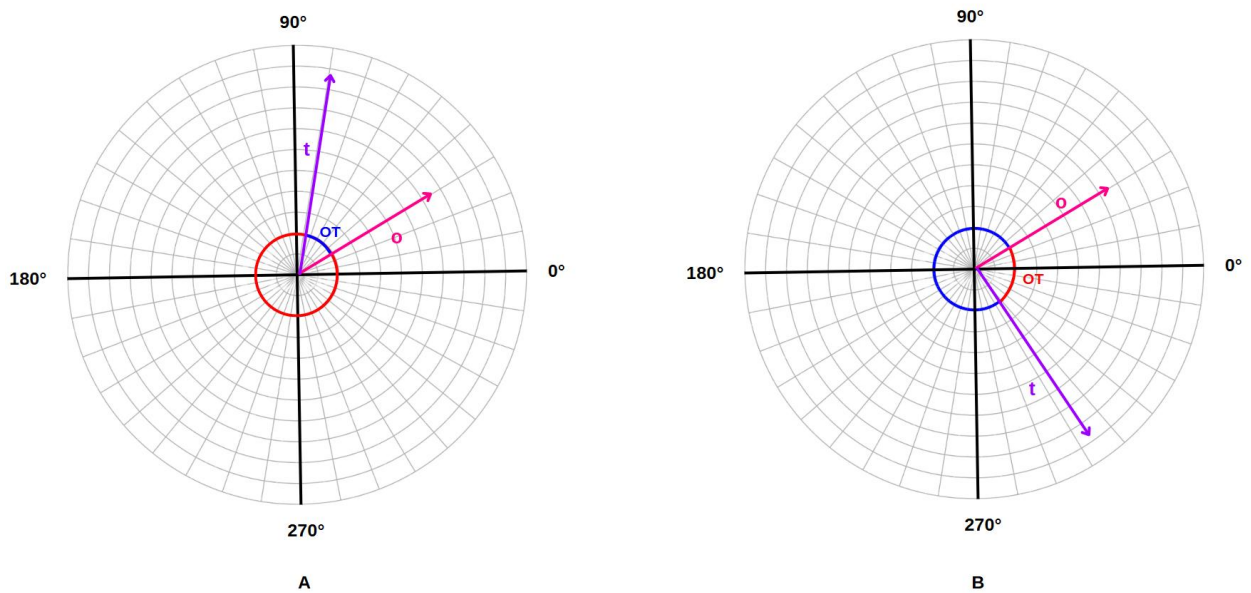
OT corresponde al ángulo formado entre los lados o y t . Dado que o y t representan magnitudes vectoriales con dirección y ubicación dentro de un plano, el ángulo OT se puede definir en la mayoría de los casos como el valor absoluto de la dirección del vector O menos la dirección del vector T :

Ecuación 6-13. Ángulo entre el lado O y T.

$$OT = |\angle O - \angle T|$$

Sin embargo, esta condición no siempre se cumple, ya que se trabaja sobre un plano polar. Se debe tener en cuenta que para el cálculo de c el ángulo OT representa el ángulo menor entre los vectores o y t , es posible que, En algunos casos, si el valor obtenido a partir de la **Ecuación 6-13** supera los 180° , será necesario considerar su ángulo complementario. La **Figura 6-34** muestra ambos escenarios: en la figura (a), la ecuación se cumple directamente, mientras que en la figura (b), se selecciona el ángulo complementario para garantizar un cálculo correcto.

Figura 6-34. Ángulo OT dependiendo de la ubicación de vectores en el plano polar.



Una vez definida el lado c o magnitud del vector c , se procede a hallar la dirección del vector, para esto, primero se halla el ángulo OC se tiene que:

$$t^2 = o^2 + c^2 - 2oc\cos(OC)$$

$$2oc\cos(OC) = o^2 + c^2 - t^2$$

Ecuación 6-14. Ángulo OC.

$$OC = \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + o^2 - t^2}{2oc}\right)$$

Después de esto, se halla la dirección de C, sin embargo, esta depende de los casos A y B anteriormente. Para el caso A se tiene que:

si $\angle T > \angle O$,

Ecuación 6-15. Dirección de C, caso A.

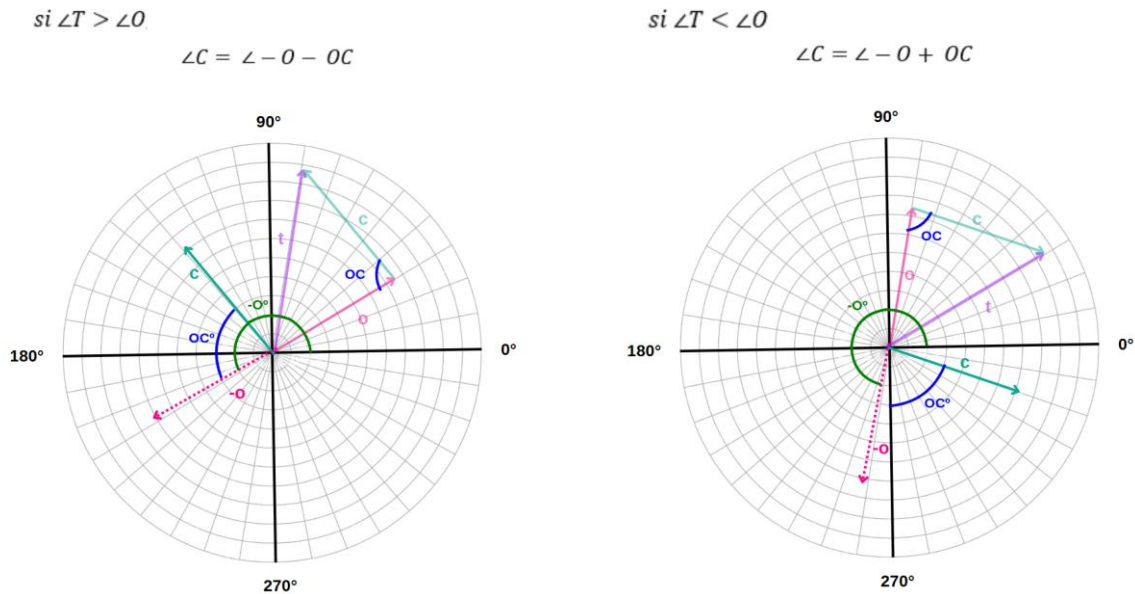
$$\angle C = \angle - O - OC$$

si no $\angle T < \angle O$,

Ecuación 6-16. Dirección de C, caso A.

$$\angle C = \angle - O + OC$$

Figura 6-35. Obtención de dirección de vector C en caso A.



Para el caso B, la dirección de C se obtiene de la siguiente manera:

si $\angle T > \angle O$,

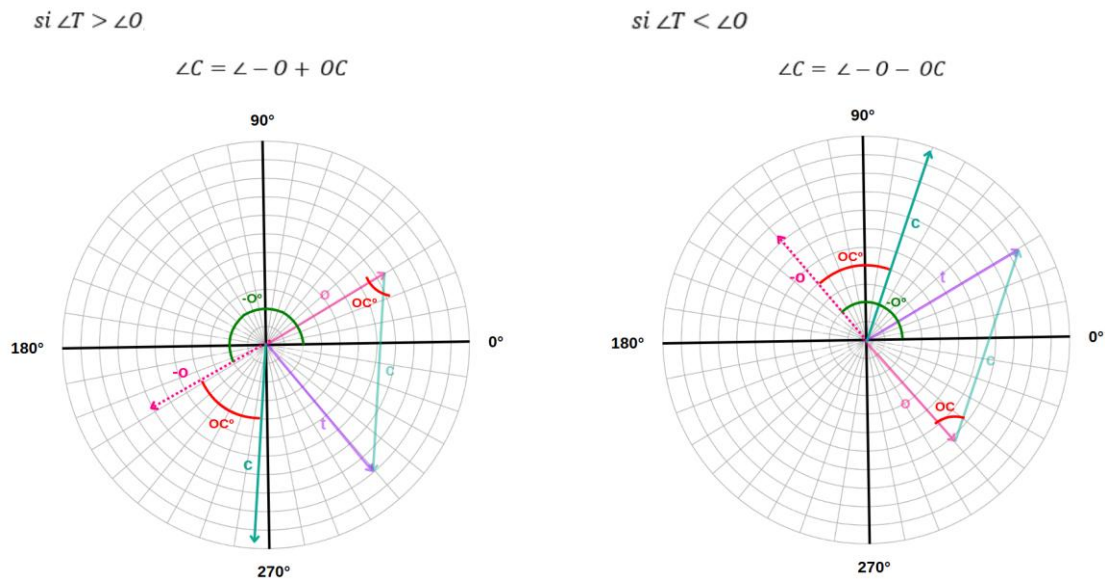
Ecuación 6-17. Dirección de C, caso B.

$$\angle C = \angle - O + OC$$

si no $\angle T < \angle O$,

Ecuación 6-18. Dirección de C, caso B.

$$\angle C = \angle - O - OC$$

Figura 6-36. Obtención de dirección de vector C en caso B.

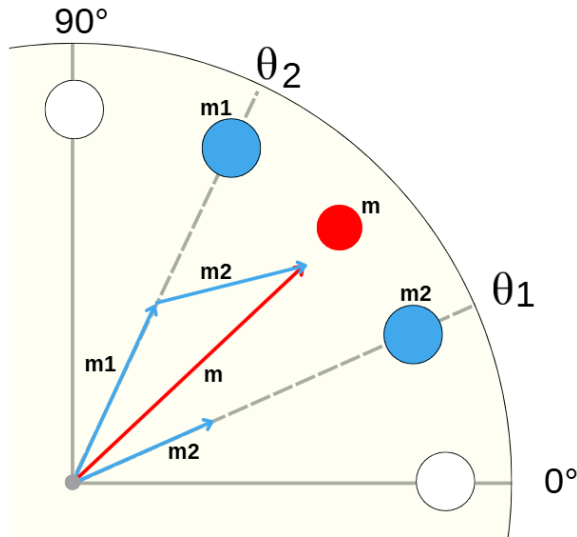
De este modo se completan las variables necesarias para calcular el peso de corrección y la ubicación de dicho peso, dadas en el informe anterior.

6.1.2 División de peso

En algunas situaciones, al instalar el peso de corrección, puede no haber orificio en la dirección necesaria o no está disponible, ya sea porque está ocupado, no es posible utilizarlo o se requiere más peso del que el orificio puede soportar. Para solucionar este problema, el peso puede dividirse entre dos orificios disponibles, asegurando que la distribución mantenga un efecto equivalente al peso original y garantizando la misma respuesta en el balanceo.

Para dividir el peso de corrección, la solución de balanceo calculada m se encuentra en un ángulo θ , ubicado entre dos orificios de balanceo (θ_1 y θ_2). Para compensarlo, se instalan dos masas m_1 y m_2 en estas posiciones angulares, generando vectores de masa correspondientes. Estos vectores deben sumarse para obtener un peso equivalente a mm , asegurando el mismo efecto de balanceo.

En este caso, m , θ , θ_1 y θ_2 son valores conocidos. Además, se asume que el radio de balanceo es el mismo para ambos orificios; de lo contrario, debe considerarse en el análisis. [14]

Figura 6-37. Esquema División de peso

Las masas y los ángulos pueden ser considerados vectores (números complejos), entonces,

Ecuación 6-19. Expresión compleja de peso a dividir

$$m_1 + m_2 = m$$

$$m_1 e^{j\theta_1} + m_2 e^{j\theta_2} = m e^{j\theta}$$

Al igualar la parte real e imaginaria se obtiene un sistema de ecuaciones donde,

Ecuación 6-20 Sistema de ecuaciones peso a dividir

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \cos\theta_2 \\ \sin\theta_1 & \sin\theta_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m\cos\theta \\ m\sin\theta \end{pmatrix}$$

Suponiendo que,

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \cos\theta_2 \\ \sin\theta_1 & \sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

Y multiplicando a ambos lados de la matriz inversa de A en la **Ecuación 6-20** se obtiene:

Ecuación 6-21 m_1 y m_2 definida por matriz inversa

$$A^{-1} * A \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} m \cos \theta \\ m \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} m \cos \theta \\ m \sin \theta \end{pmatrix}$$

La inversa de A se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 6-22. Matriz inversa de A

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{\cos \theta_1 \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \cos \theta_2} \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

Reemplazando A^{-1} en la **Ecuación 6-21** y expandiendo el sistema se obtiene:

Ecuación 6-23. Expansión sistema de ecuaciones

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} m \cos \theta \\ m \sin \theta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} & -\frac{\cos \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \\ -\frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} & \frac{\cos \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} m \cos \theta \\ m \sin \theta \end{pmatrix}$$

Por último, se calculan los términos m_1 y m_2

Ecuación 6-24. Peso m_1

$$m_1 = \frac{\sin\theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (m\cos\theta) - \frac{\cos\theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (m\sin\theta)$$

$$m_1 = \frac{m}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (\sin\theta_2 \cos\theta - \cos\theta_2 \sin\theta)$$

$$m_1 = m \frac{\sin(\theta_2 - \theta)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

Ecuación 6-25 Peso m_2

$$m_2 = -\frac{\sin\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (m\cos\theta) + \frac{\cos\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (m\sin\theta)$$

$$m_2 = \frac{m}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} (-\sin\theta_1 \cos\theta + \cos\theta_1 \sin\theta)$$

$$m_2 = m \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

6.1.2.1. Ejemplo división del peso

Para un peso de balanceo calculado de 5 gramos con una ubicación indicada en 42° , no se dispone de un orificio en dicha posición. Los orificios disponibles se encuentran en 20° y 90° , por lo que en este caso se establecen $m = 5gr$, $\theta = 42^\circ$, $\theta_1 = 20^\circ$ y $\theta_2 = 90^\circ$, reemplazando estos valores en las ecuaciones 7.24 y 7.25 se obtiene: [14]

$$m_1 = m \frac{\sin(\theta_2 - \theta)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$m_1 = 5 \frac{\sin(90 - 42)}{\sin(90 - 20)} = 4 \text{ g}$$

Y para m_2 ,

$$m_2 = m \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$m_2 = 5 \frac{\sin(42 - 20)}{\sin(90 - 20)} = 2 \text{ g}$$

Como resultado se debe instalar 4 gramos en 20° y 2 gramos en 90°, estos pesos producen el mismo efecto que colocar 5 gramos en 42°, asegurando una respuesta equivalente en el balanceo.

6.1.3. Verificación de balanceo con norma ISO 21940

El desbalance siempre está presente en los sistemas, incluso después de uno o varios procesos de balanceo, ya que solo en condiciones ideales podría reducirse a cero. Para garantizar la eficiencia del balanceo, es fundamental que el desbalance final sea menor a la tolerancia, la cual según la norma ISO 21940 (dedicada a establecer los procedimientos y criterios para la verificación del balanceo en máquinas rotativas) puede definirse de cinco maneras. [17]

- Clases de calidad de balanceo
- Evaluación experimental de los desbalances residuales permisibles
- Limitación de las fuerzas en los rodamientos debido al desbalance
- Limitación de las vibraciones causadas por el desbalance
- Experiencia establecida con tolerancias de desbalance

En este caso, la verificación del balanceo se realizará mediante el método de **clases de calidad de balanceo**, basado en la experiencia práctica a largo plazo con una amplia variedad de rotores. La tolerancia se define en función del desbalance permisible U_{per} , mientras que el desbalance resultante del proceso de balanceo se conoce como desbalance residual U_{res} . Para que el balanceo sea aceptable, el desbalance residual debe cumplir la siguiente condición:

Ecuación 6-26. Desbalance residual permisible

$$U_{res} \leq U_{per}$$

Los desbalances tanto permisible como residual están dados en de unidades de masa por distancia, las maneras más prácticas son $g * mm, kg * mm$ o $mg * mm$.

La relación de U_{per} con la masa del rotor, m , es el *desbalance específico residual permisible* e_{per} y está definido de manera práctica en unidades de $g * mm/kg$.

Si la **Ecuación 6-26** no se cumple, es posible que sea necesario repetir el proceso de balanceo, a menos que los valores de desequilibrio residual se encuentren dentro de los límites especificados por el fabricante del equipo.

Ecuación 6-27. Desbalance específico residual permisible

$$e_{per} = \frac{U_{per}}{m}$$

También, este desbalance puede ser definido con la velocidad de servicio, dado por la Ecuación 6-28. [17]

Ecuación 6-28 Desbalance específico residual permisible y velocidad de servicio

$$e_{per}\Omega = c$$

$$e_{per} = \frac{c}{\Omega}$$

Donde Ω es la velocidad angular de la velocidad de servicio dada en rad/s , por otro lado c es una constante.

Según la norma **ISO 21940-11**, se han definido categorías de calidad de balanceo **G** basadas en la experiencia global y en consideraciones de similitud. Estas categorías permiten clasificar los requisitos de balance para distintos tipos de maquinaria y calcular los desbalances residuales permisibles. La norma establece que la calidad de balanceo se determina mediante el producto de e_{per} (desbalance específico residual permisible) y la velocidad angular Ω , expresado en mm/s .

Dado que $e_{per}\Omega$ es una constante dentro de cada categoría de calidad, se mantiene una relación proporcional entre el desbalance específico y la velocidad. [17] De acuerdo con lo anterior, el grado de calidad se define en la **Ecuación 6-29** y sus unidades comúnmente son mm/s .

Ecuación 6-29. Grado de calidad de balanceo

$$G = e_{per} \Omega$$

La siguiente imagen presenta los grados de calidad de balanceo clasificados según los tipos de maquinaria típicos, basándose en la experiencia mundial y en los criterios de similitud establecidos por la norma.[17]

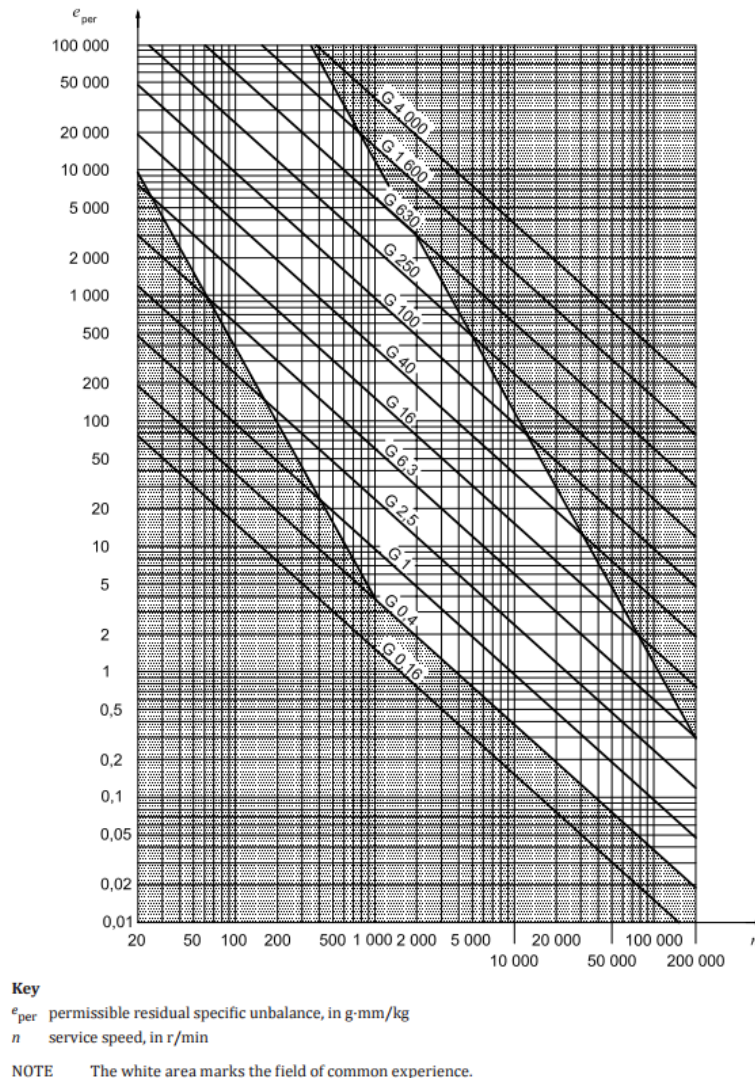
Figura 6-38. Grado de calidad de balanceo en maquinaria típica

Machinery types: General examples	Balance quality grade G	Magnitude $e_{per} \Omega$ mm/s
Crankshaft drives for large, slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently unbalanced	G 4000	4 000
Crankshaft drives for large, slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently balanced	G 1600	1 600
Crankshaft drives, inherently unbalanced, elastically mounted	G 630	630
Crankshaft drives, inherently unbalanced, rigidly mounted	G 250	250
Complete reciprocating engines for cars, trucks and locomotives	G 100	100
Cars: wheels, wheel rims, wheel sets, drive shafts Crankshaft drives, inherently balanced, elastically mounted	G 40	40
Agricultural machinery Crankshaft drives, inherently balanced, rigidly mounted Crushing machines Drive shafts (cardan shafts, propeller shafts)	G 16	16
Aircraft gas turbines Centrifuges (separators, decanters) Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds up to 950 r/min Electric motors of shaft heights smaller than 80 mm Fans Gears Machinery, general Machine tools Paper machines Process plant machines Pumps Turbo chargers Water turbines	G 6,3	6,3
Compressors Computer drives Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds above 950 r/min Gas turbines and steam turbines Machine-tool drives Textile machines	G 2,5	2,5
Audio and video drives Grinding machine drives	G 1	1
Gyroscopes Spindles and drives of high-precision systems	G 0,4	0,4
NOTE 1 Typically, completely assembled rotors are classified here. Depending on the particular application, the next higher or lower grade may be used instead. For components, see Clause 9 .		
NOTE 2 All items are rotating if not otherwise mentioned (reciprocating) or self-evident (e.g. crankshaft drives).		
NOTE 3 For some additional information on the chosen balance quality grade, see Figure 2 which contains generally used areas (service speed and balance quality grade G) based on common experience.		
NOTE 4 For some machines, specific International Standards stating unbalance tolerances exist.		
NOTE 5 The selection of a balance quality grade G for a machine type requires due consideration of the expected duty of the rotor when installed <i>in situ</i> which typically reduces the grade to a lower level if lower vibration magnitudes are required in service.		
NOTE 6 The shaft height of a machine without feet, or a machine with raised feet, or any vertical machine, is to be taken as the shaft height of a machine in the same basic frame, but of the horizontal shaft foot-mounting type. When the frame is unknown, half of the machine diameter should be used.		

Fuente: Internacional Organization for Standardization. Mechanical vibration — Rotor balancing — Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour. ISO 21940-11. 2016. [17]

También, el e_{per} se puede hallar por medio de la siguiente carta expuesta por la norma en la cual grafica el desbalance específico residual permisible basado el grado de calidad y la velocidad del servicio en rpm.

Figura 6-39. Carta de Desbalance específico residual basado en el grado de calidad y velocidad.



Fuente: Internacional Organization for Standardization. Mechanical vibration — Rotor balancing — Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour. ISO 21940-11. 2016. [17]

Para calcular el desbalance residual, se debe conocer la sensibilidad del rotor, esta sensibilidad está definida por variables del proceso de balanceo, como el peso de calibración instalados, el radio de instalación y el vector de respuesta total por el peso colocado.

Ecuación 6-30. Sensibilidad del rotor

$$\text{Sensibilidad rotor} = \frac{m_{cal} * r_u}{T}$$

Donde,

m_{cal} : Peso de calibración en gramos

r_u : Radio de disponibilidad del rotor de balanceo en milímetros

T : Amplitud del vector total en unidades de vibración

Una vez determinada la sensibilidad del rotor, se calcula el desbalance residual utilizando la **Ecuación 6-31**. De este modo, se obtienen las variables necesarias para verificar el proceso de balanceo.

Ecuación 6-31. Desbalance residual

$$U_{res} = \text{Sensibilidad rotor} * F$$

Donde,

F : Amplitud de vector de desbalance final en unidades de vibración

6.1.3.1 Ejemplo verificación de balanceo

En este ejemplo, un ventilador encargado de mantener la temperatura de un proceso de sinterización tiene un peso de 3500 kg, el ventilador gira a 900 rpm, el radio disponible para la instalación de pesos de balanceo corresponde a 112 cm. Se realiza balanceo del rotor a la velocidad de operación, los datos correspondientes al proceso se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6-12 Datos de balanceo ejemplo de verificación

Variable	Amplitud	Fase
Vector original	10,76 mil	303°
Vector total	9,075 mil	289°
Vector final	2,17 mil	212°
Peso de calibración	345,12 g	123°

Lo primero, es definir el grado de calidad del equipo, basados la carta de la **Figura 6-39** dada por la norma, el ventilador tiene un grado de calidad de **G 6.3**, una vez definido esto, se halla el desbalance permisible, para ello se utiliza la **Ecuación 6-27** y **Ecuación 6-28**.

$$e_{per} = \frac{G}{\Omega} = \frac{6.3 \frac{mm}{s}}{900 \left(\frac{rev}{min} \right) * 2\pi \left(\frac{1}{rev} \right) * \frac{1}{60} \left(\frac{min}{s} \right)}$$

$$e_{per} = 0,0668 \text{ mm}$$

$$U_{per} = e_{per} * m = 0,0668 \text{ mm} * 3500 \text{ kg} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$U_{per} = 233800 \text{ g} * \text{mm}$$

Lo siguiente es hallar el **desbalance residual**, restante del proceso de balanceo realizado, en el cual se utiliza la **Ecuación 6-30** y la **Ecuación 6-31** con los datos mostrados en la **tabla 7.6**.

$$\text{Sensibilidad rotor} = \frac{m_{cal} * r_u}{T} = \frac{344,15 \text{ gr} * 112 \text{ cm} * \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}}}{9,075 \text{ mil}}$$

$$\text{Sensibilidad rotor} = 42597 \left(\frac{\text{g mm}}{\text{mil}} \right)$$

$$U_{res} = \text{sensibilidad rotor} * F = 42597 \left(\frac{\text{g mm}}{\text{mil}} \right) * 2,17 \text{ mil}$$

$$U_{res} = 92435,5 \text{ g mm}$$

Por último, se comparan el desbalance residual con respecto al desbalance permisible, para este caso, el balanceo fue efectivo ya que cumple con la relación dada en la **Ecuación 6-26**.

$$U_{res} \leq U_{per}$$

$$92435,5 \text{ g mm} \leq 233800 \text{ g mm}$$

6.1.4 Análisis de funcionalidades y requerimientos

Con el fin de comprender y satisfacer los principales requerimientos de los clientes y/o usuarios del aplicativo, se realiza una encuesta a **10 clientes potenciales** (Ingenieros dedicados a el área de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo) de la aplicación, esto por medio del software de formularios de Google. El instrumento de recolección de datos incluyó diez preguntas de selección múltiple y una pregunta abierta, diseñadas para ofrecer una visión preliminar tanto del algoritmo como de la interfaz de usuario, en función de las necesidades identificadas, las preguntas y opciones de respuesta se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6-13. Preguntas.

Nº	PREGUNTA	OPCIONES DE RESPUESTA
1	¿Realiza balanceo en campo?	Sí
		No
2	¿Con qué frecuencia realiza actividades de balanceo en rotores?	Frecuentemente (más de 2 veces al mes)
		Ocasionalmente (1 vez al mes)
		Rara vez
		Nunca
3	¿Qué tipo de maquinaria suele balancear? (Marque las que apliquen)	Ventiladores
		Turbinas
		Motores
		Otra, cuál?
4	En una escala de 1 a 5, ¿Qué tan importante considera que sea intuitiva y fácil de usar una aplicación para balanceo?	1 (Poco importante)
		2
		3
		4
		5 (Muy importante)
5	¿Preferiría que la aplicación tenga soporte para varios idiomas?	Sí
		No
		Indiferente
6	¿Qué funciones considera indispensables en una aplicación de balanceo en un plano? (Marque las que considere)	Cálculo automático de correcciones
		Visualización gráfica del desequilibrio
		Guía paso a paso del procedimiento
		Otra, cuál?
7	¿Le gustaría que la aplicación ofreciera una calculadora integrada de pesos de calibración por características del rotor?	Sí
		No
		Indiferente

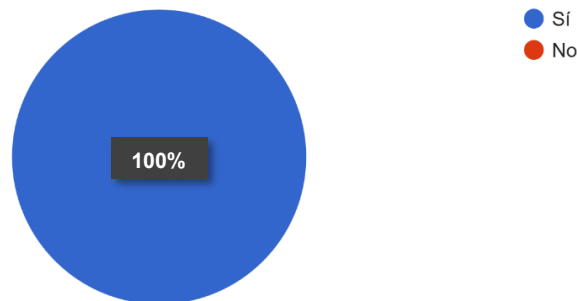
Tabla 6-14. Preguntas (cont.).

8	¿Le gustaría que la aplicación ofreciera una calculadora integrada de división pesos de corrección?	Sí
		No
		Indiferente
9	¿Le gustaría que la aplicación indique si el balanceo se encuentra dentro de las normas ISO 21940?	Sí
		No
		Indiferente
10	¿Qué tipo de plataforma prefiere para este tipo de herramienta?	Aplicación de escritorio (Windows, sin internet)
		Aplicación web (Necesita internet)
		Aplicación móvil (Android/iOS)
		Indiferente
11	¿Qué otras funcionalidades le gustaría que tuviera la aplicación? (OPCIONAL)	Cuadro de texto

La primera pregunta tuvo como objetivo verificar si los encuestados realizan la actividad de balanceo de rotores en campo. Como resultado, se obtuvo que el 100 % de los participantes efectivamente llevan a cabo este proceso.

Figura 6-40. Resultados pregunta 1.

¿Realiza balanceo en campo?
10 respuestas

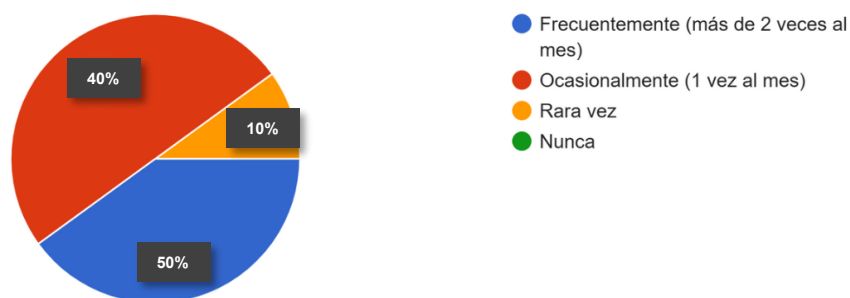


La segunda pregunta estuvo orientada a identificar la frecuencia con la que los encuestados realizan la actividad de balanceo. Los resultados muestran que el 50 % de los participantes lleva a cabo este procedimiento con regularidad, es decir, más de dos veces al mes. Esta información permite estimar la posible frecuencia de uso del aplicativo en condiciones reales.

Figura 6-41. Resultados pregunta 2.

¿Con qué frecuencia realiza actividades de balanceo en rotores?

10 respuestas

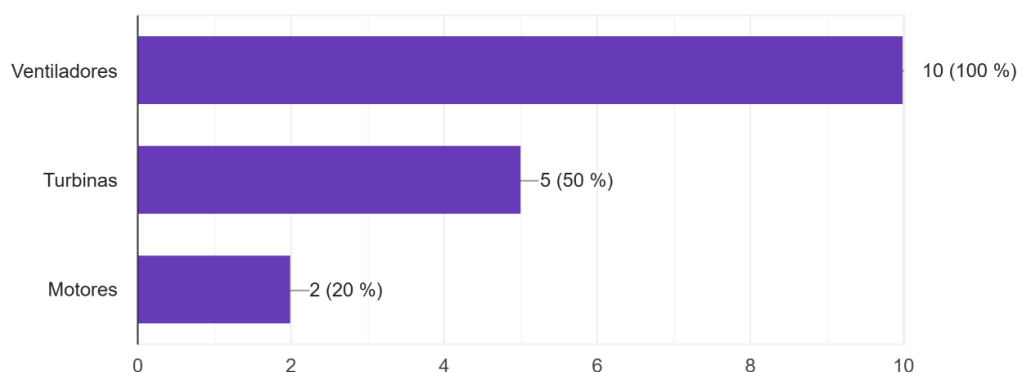


La tercera pregunta tuvo como objetivo identificar los tipos de equipos o maquinarias en los cuales los usuarios suelen realizar procedimientos de balanceo. Se presentaron como opciones ventiladores, turbinas, motores, y un campo abierto para incluir otros equipos no listados. No obstante, los encuestados no mencionaron maquinaria adicional. De acuerdo con los resultados, los ventiladores representan el equipo más común para esta actividad, ya que la totalidad de los participantes (10 de 10) indicó realizar balanceo en este tipo de dispositivo.

Figura 6-42. Resultados pregunta 3.

¿Qué tipo de maquinaria suele balancear? (Marque las que apliquen)

10 respuestas

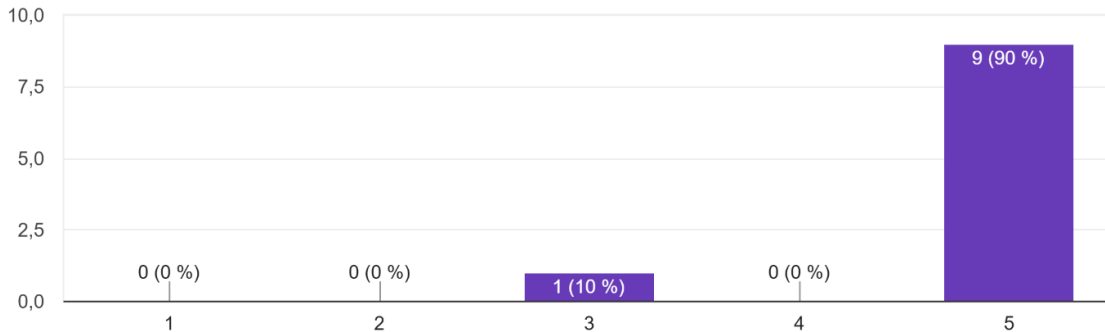


La cuarta pregunta se enfocó en evaluar la importancia de contar con una aplicación que cuente con una interfaz intuitiva y de fácil uso para el proceso de balanceo. Los resultados indican que el 90 % de los encuestados calificó este aspecto con un puntaje de 5 en una escala de valoración, lo cual corresponde al nivel de "muy importante".

Figura 6-43. Resultados pregunta 4.

En una escala de 1 a 5, ¿Qué tan importante considera que sea intuitiva y fácil de usar una aplicación para balanceo?

10 respuestas

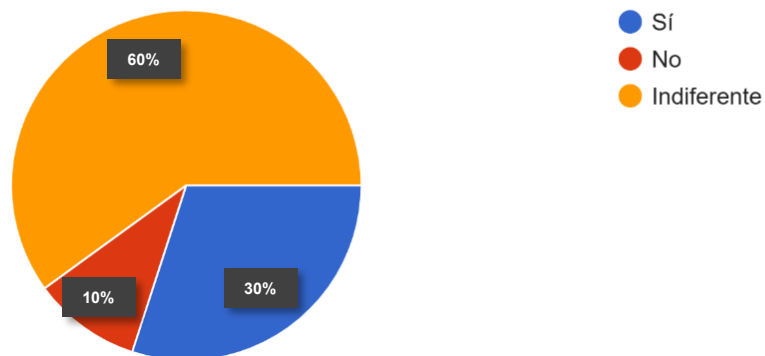


La quinta pregunta propuso la posibilidad de que el aplicativo cuente con soporte para múltiples idiomas. Los resultados muestran que el 60 % de los encuestados considera esta opción como indiferente, mientras que un 30 % manifestó su preferencia por contar con dicha funcionalidad. En consecuencia, esta característica se contempla como una posible mejora a implementar en futuras versiones de la aplicación.

Figura 6-44. Resultados pregunta 5.

¿Preferiría que la aplicación tenga soporte para varios idiomas?

10 respuestas



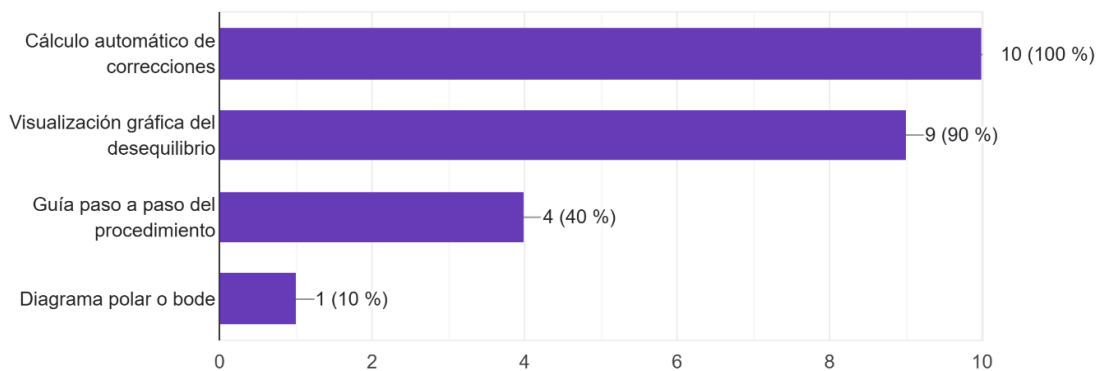
La sexta pregunta presentó tres funciones consideradas fundamentales para una aplicación orientada al balanceo: el cálculo automático de las correcciones (peso), la visualización gráfica del desequilibrio y una guía paso a paso del procedimiento. Además, se incluyó un campo abierto para que los encuestados pudieran sugerir otras funcionalidades. Los resultados indican que la opción del cálculo automático de corrección de peso fue seleccionada por la totalidad de los participantes (10 de

10), seguida por la visualización de la gráfica de desequilibrio, con 9 de 10 votos. Adicionalmente, se recibe una sugerencia que propuso incluir un gráfico polar o de Bode; en respuesta a esta observación, se opta por representar el desequilibrio mediante un gráfico polar en el desarrollo de la aplicación. De acuerdo con las respuestas, se implementan las tres funciones propuestas, la guía del procedimiento se presenta por medio del manual del aplicativo.

Figura 6-45. Resultados pregunta 6.

¿Qué funciones considera indispensables en una aplicación de balanceo en un plano? (Marque las que considere)

10 respuestas

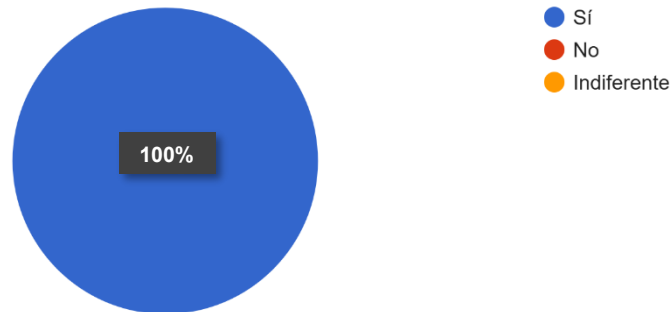


La séptima pregunta plantea la posibilidad de que la aplicación incluya una calculadora integrada que sugiera pesos de calibración en función de las características del rotor. El 100 % de los encuestados manifestó estar de acuerdo con esta funcionalidad, lo que evidencia la relevancia de contar con herramientas que faciliten el proceso de balanceo, especialmente para quienes no disponen previamente de esta información. Aunque algunos usuarios experimentados ya conocen el peso de calibración para ciertos equipos, disponer de una herramienta que lo sugiera contribuye a estandarizar el procedimiento y minimizar errores por suposiciones o falta de datos.

Figura 6-46. Resultados pregunta 7.

¿Le gustaría que la aplicación ofreciera una calculadora integrada de pesos de calibración por características del rotor?

10 respuestas

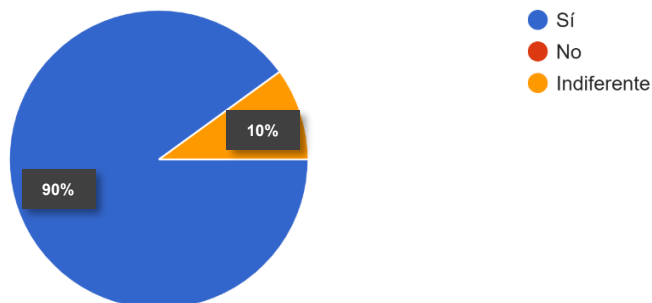


La octava pregunta propuso la inclusión de una calculadora integrada orientada a la división de los pesos de corrección. El 90 % de los encuestados respondió de manera afirmativa, lo que refleja un alto nivel de interés en la incorporación de esta funcionalidad dentro de la aplicación.

Figura 6-47. Resultados pregunta 8.

¿Le gustaría que la aplicación ofreciera una calculadora integrada de división pesos de corrección?

10 respuestas

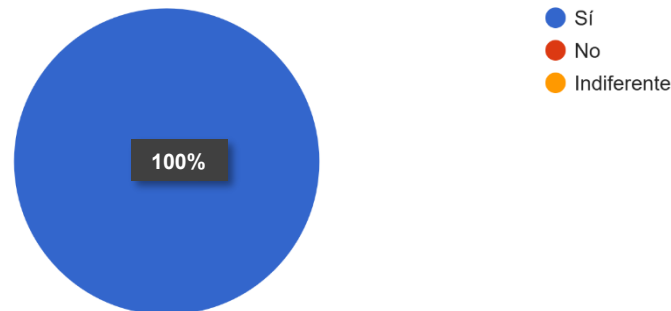


La novena pregunta sugiere una función de la calculadora encargada de indicar si el balanceo realizado se encuentra dentro del estándar permisible basado en la norma ISO 21940, el 100% de las respuestas fueron afirmativas, lo cual indica que los encuestados están interesados en verificar el proceso con un estándar internacional.

Figura 6-48. Respuesta pregunta 9.

¿Le gustaría que la aplicación indique si el balanceo se encuentra dentro de las normas ISO 21940?

10 respuestas

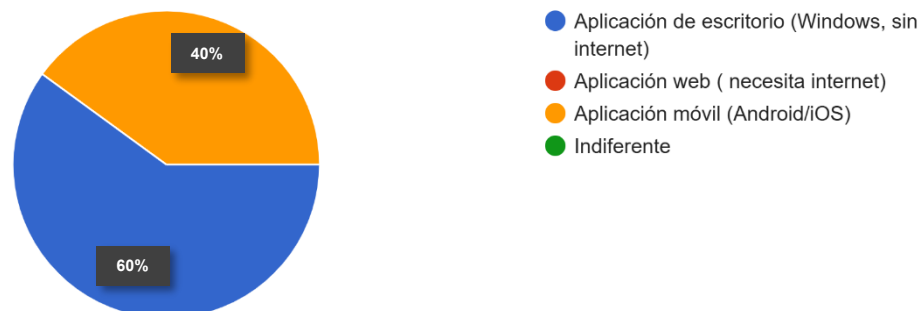


La décima pregunta indagó sobre el tipo de aplicación preferida por los usuarios, presentando opciones como aplicación de escritorio, web, móvil o indiferente. Los resultados mostraron que el 60 % de los encuestados se inclinó por la aplicación de escritorio, mientras que el 40 % prefirió la versión móvil. Esto evidencia que ambas alternativas despiertan interés, aunque la mayoría se inclina por la opción de escritorio. Por esta razón, se decidió priorizar su desarrollo inicial, sin descartar la posibilidad de una versión móvil, la cual se considera una implementación futura para ampliar el alcance y la versatilidad del proyecto.

Figura 6-49. Respuesta pregunta 10.

¿Qué tipo de plataforma prefiere para este tipo de herramienta?

10 respuestas



Finalmente, la undécima pregunta, de carácter opcional, permitió a los encuestados sugerir otras funcionalidades que considerarían útiles para la aplicación. Las respuestas se ilustran en la **Figura 6-50**. Todas las sugerencias serán tenidas en cuenta, en cuanto a ver los históricos de balanceo, se suple la sugerencia por medio de una generación de informe en **.pdf** con los datos usados y los resultados de los procesos, esto con el fin de generar una trazabilidad de los diferentes procesos que

se vayan a realizar, también se considera la posibilidad de generar un **.csv** en el cual se exporte las variables con sus valores correspondientes si se desean.

Figura 6-50. Respuestas pregunta 11.

¿Qué otras funcionalidades le gustaría que tuviera la aplicación? (OPCIONAL)

6 respuestas

Visualización del gráfico polar y vectores
Visualización de la ubicación de los sensores de balanceo.
Ver históricos de balanceo
Gráfico polar.
Que funcione sin conexión a internet
Que tenga alertas cuando algo esté mal ingresado

6.2. LÓGICA DE PROGRAMACIÓN

El *Integrated Development Environment* (IDE), o entorno de desarrollo integrado, es una herramienta cuyo propósito es facilitar la integración entre los lenguajes de programación y las plataformas de los sistemas operativos o entornos de desarrollo. Este tipo de entorno permite diseñar y desarrollar fácilmente aplicaciones informáticas para escritorio, web o dispositivos móviles. [18]

Para el desarrollo de la aplicación de escritorio orientada al proceso de balanceo en rotores rígidos, se seleccionó el IDE **Visual Studio**. Este entorno permite gestionar todo el ciclo de desarrollo en un solo lugar, ya que ofrece funciones para escribir, editar, depurar y compilar código de manera **gratuita**. [19] Además, cuenta con un conjunto completo de herramientas para el desarrollo de aplicaciones de escritorio, aplicaciones web con ASP.NET, servicios web en XML y aplicaciones móviles. [18]

Una de las ventajas más destacadas de este entorno de desarrollo integrado (IDE) es la disponibilidad de pruebas integradas, las cuales incluyen herramientas automatizadas para la creación y ejecución de pruebas unitarias. [20] Estas funcionalidades permiten verificar el comportamiento del código de manera sistemática durante el proceso de desarrollo, lo que contribuye a mejorar la calidad del algoritmo y a reducir la ocurrencia de errores en etapas posteriores, especialmente en el entorno de producción.

Tras el análisis de los requerimientos y análisis matemático del proceso de balanceo, su verificación y la posible división del peso, es fundamental establecer una lógica de programación mediante diagramas de flujo. Esto permite definir con

claridad las variables de entrada y salida, facilitando tanto la implementación del algoritmo como el diseño del prototipo o boceto de la interfaz visual del programa. La aplicación está dividida en 3 módulos, correspondientes al balanceo en un plano, división del peso y verificación del balanceo basado en la norma ISO 21940.

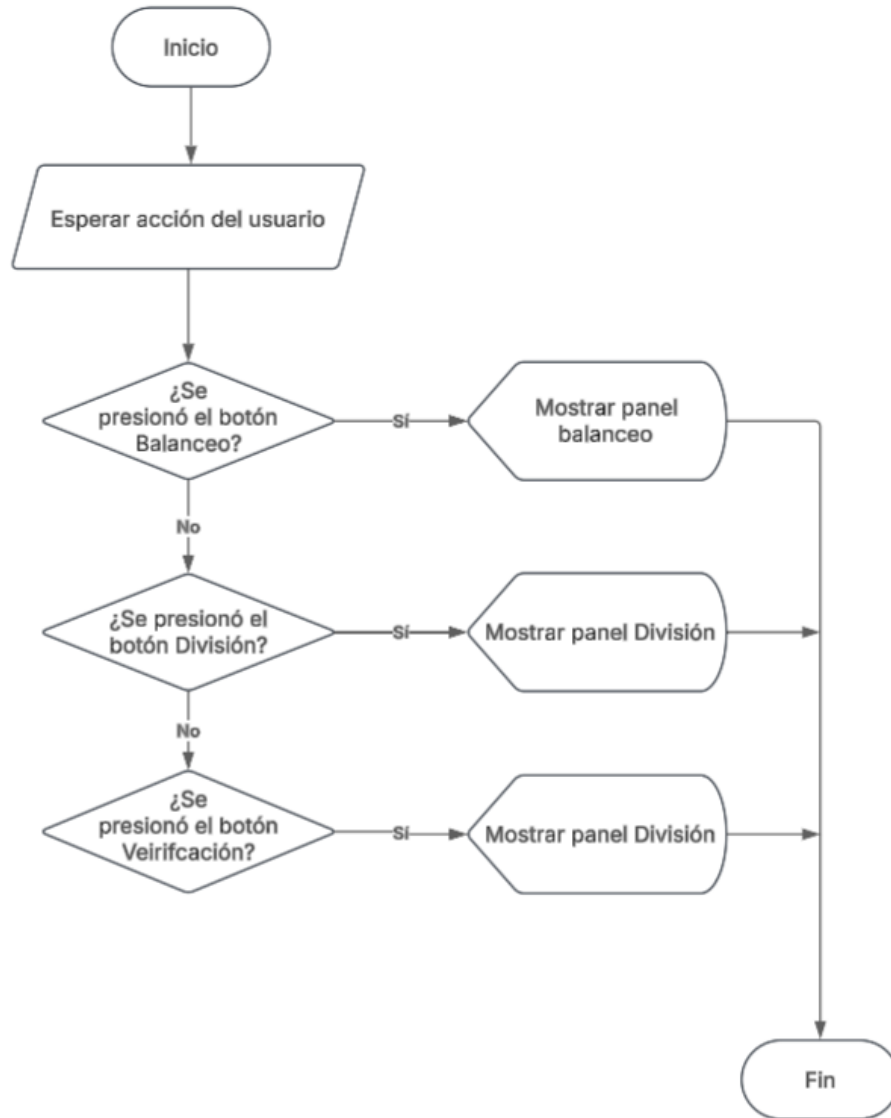
6.2.1. Lógica de programación módulo de balanceo

La interfaz principal es la encargada de dirigir el usuario a cualquiera de los módulos según su selección, el diagrama de flujo se presenta a en la **Figura 6-51**.

Por otro lado, el módulo de balanceo es el encargado de realizar el balanceo en un plano de acuerdo con lo visto en el apartado **6.1.1.3**, este a partir de los vectores ingresados y el peso de calibración calcula el peso de corrección y ubicación de este para contrarrestar el fenómeno de desbalance. Para el panel de este módulo, con apoyo del proceso se definen las variables de entrada y salida mostradas en la **Tabla 6-15**.

Tabla 6-15. Variables de entrada y salida módulo de balanceo.

VARIABLE ENTRADA	VARIABLE DE SALIDA
Velocidad de balanceo	Sugerencia peso de calibración
Peso del rotor	Peso de corrección
Radio de balanceo	Ubicación peso de corrección
Sentido de giro	Amplitud vector C
Orientación del sensor	Dirección vector C
Amplitud Vector O	Gráfico vector O
Dirección Vector O	Gráfico vector T
Peso de calibración puesto	Gráfico vector C
Ubicación peso de calibración	Gráfico ubicación peso de corrección
Amplitud Vector T	
Dirección Vector T	

Figura 6-51. Diagrama de flujo interfaz principal.

La amplitud y dirección del vector C son fundamentales para el cálculo del peso de corrección, se ve la necesidad de mostrar esta variable con el fin de generar confianza al usuario o si desea hacer el método gráfico en paralelo con el aplicativo.

El diagrama de flujo del módulo de balanceo se presenta desde la **Figura 6-52** hasta la **Figura 6-55** detallando la validación de los datos ingresados por el usuario. Asimismo, se describe de manera general el proceso de balanceo en un plano, proporcionando una visión estructurada de su funcionamiento. Por otro lado, en todos los procesos se realiza verificación de datos (como espacios en blanco, si son numéricos o tienen el formato adecuado), con el propósito de evitar errores en los cálculos.

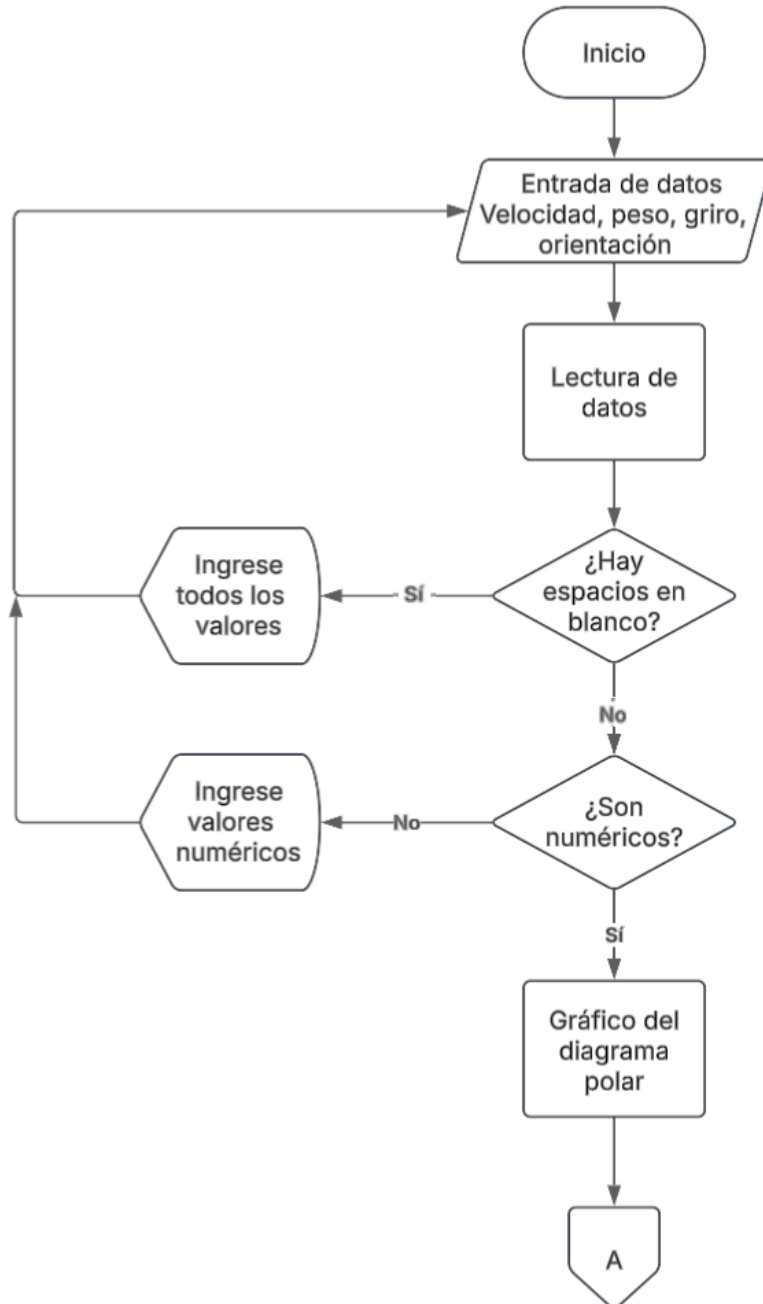
Figura 6-52. Diagrama de flujo módulo de balanceo primera parte.

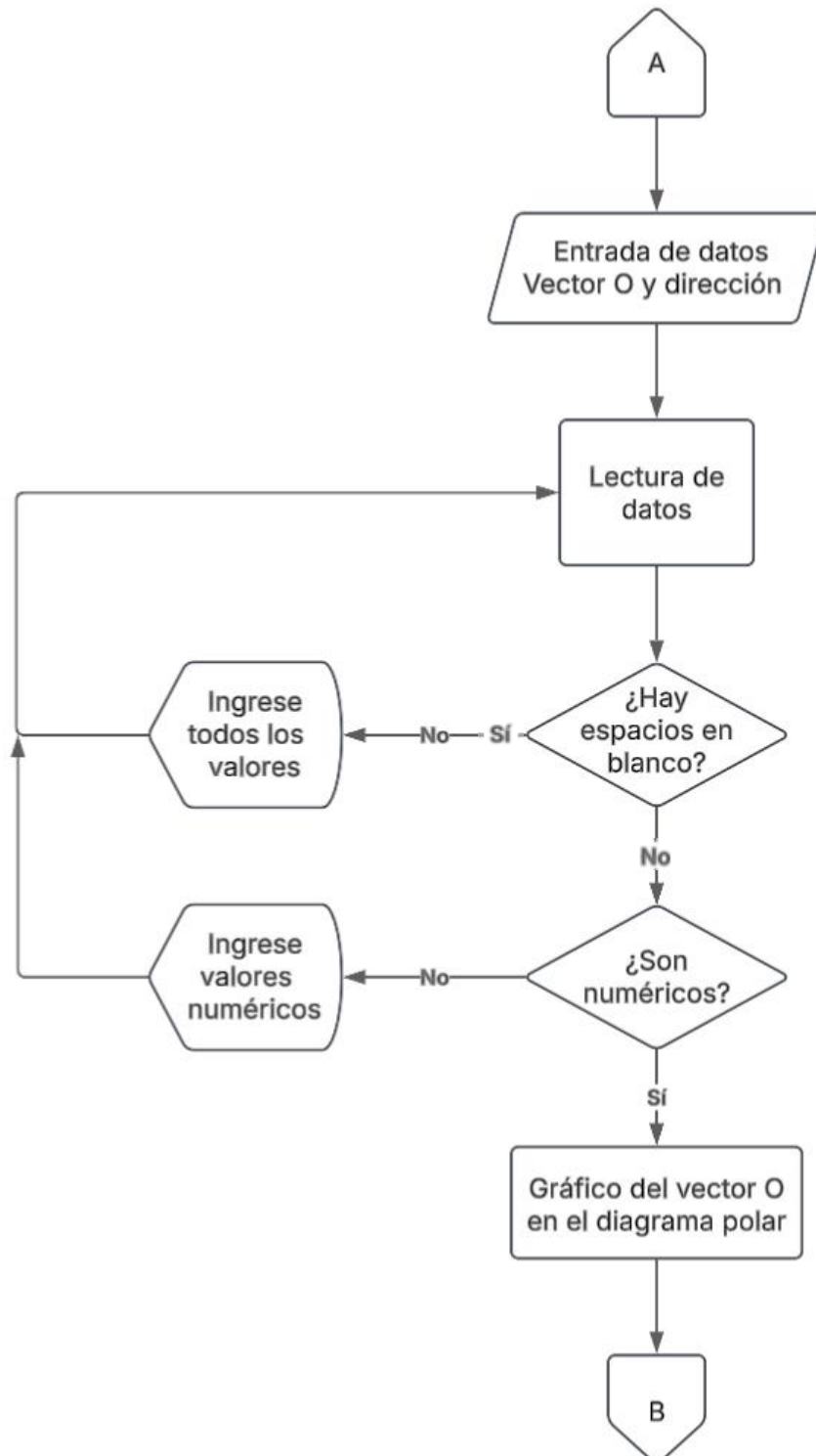
Figura 6-53. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte A.

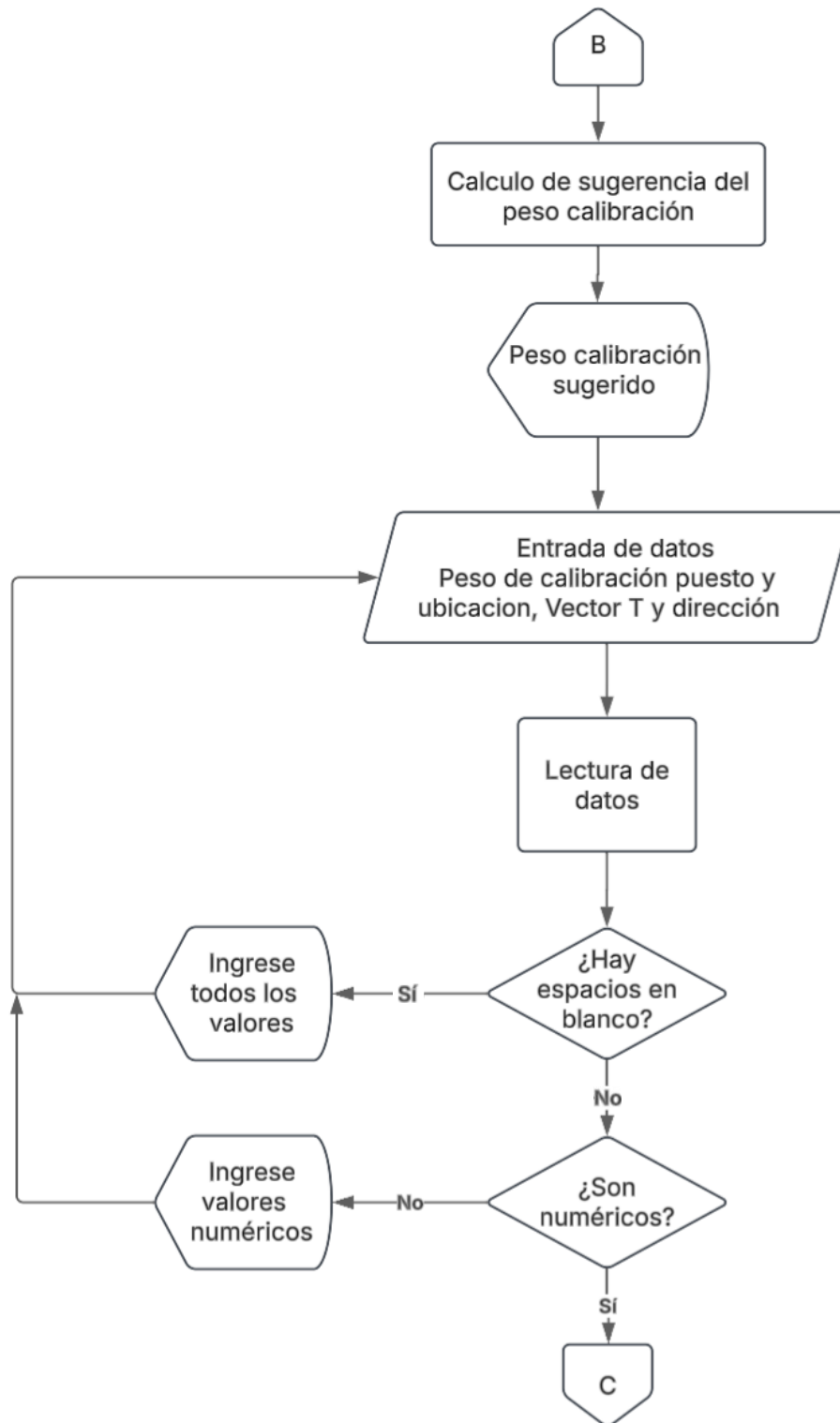
Figura 6-54. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte B.

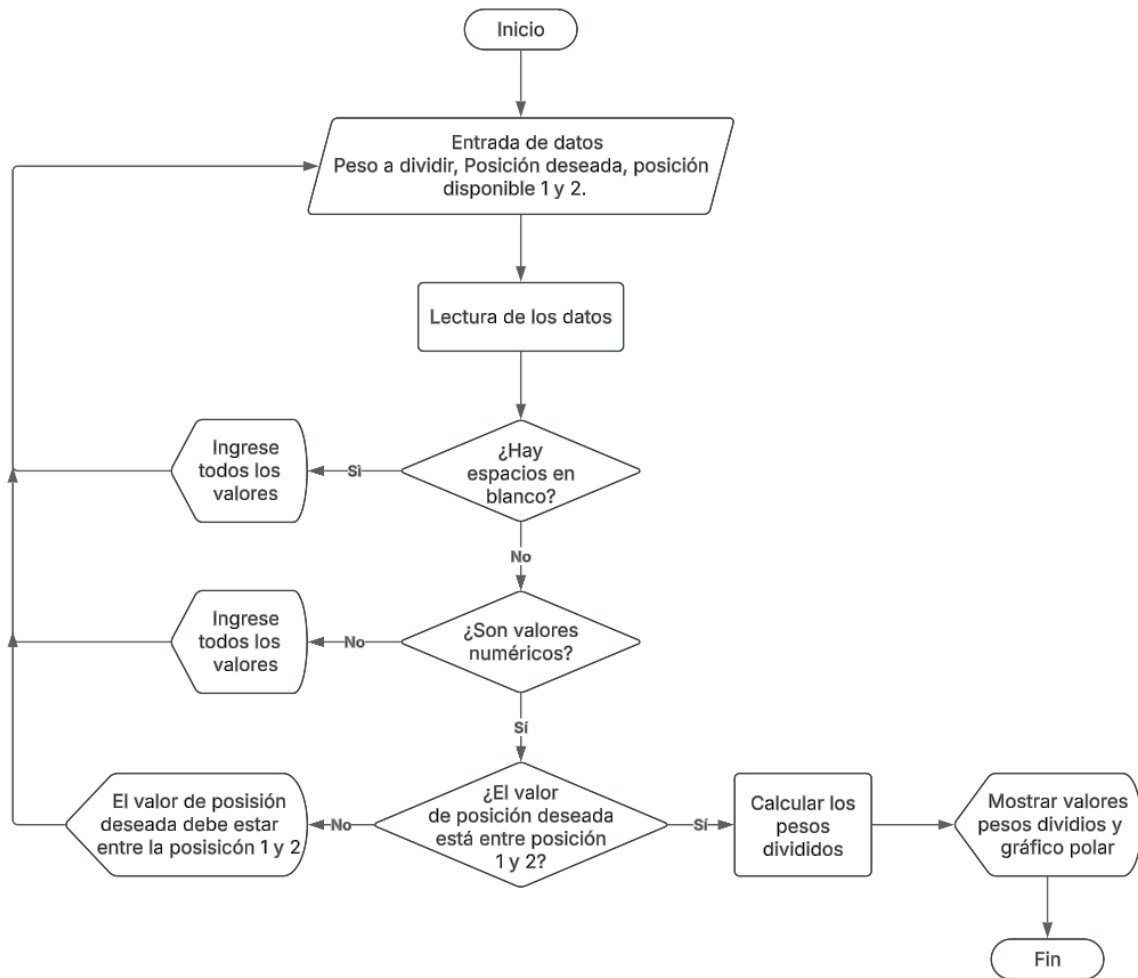
Figura 6-55. Diagrama de flujo módulo de balanceo parte C.

6.2.2. Lógica de programación módulo de división de peso

El módulo de división de peso se encarga de redistribuir el peso de corrección cuando la ubicación calculada no está disponible. Para ello, determina dos masas en posiciones distintas que generan el mismo efecto que un único peso en la ubicación original. Este módulo opera con cuatro variables de entrada y cuatro de salida, representando gráficamente los resultados en un diagrama polar de orientación fija. El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la **Figura 6-56**.

Tabla 6-16. Variables de entrada y salida del módulo división de peso.

Entrada	Salida
Peso a dividir	Masa dividida en posición 1
Posición deseada	Masa dividida en posición 2
Posición disponible 1	Gráfico masa en posición 1
Posición disponible 2	Gráfico masa en posición 2

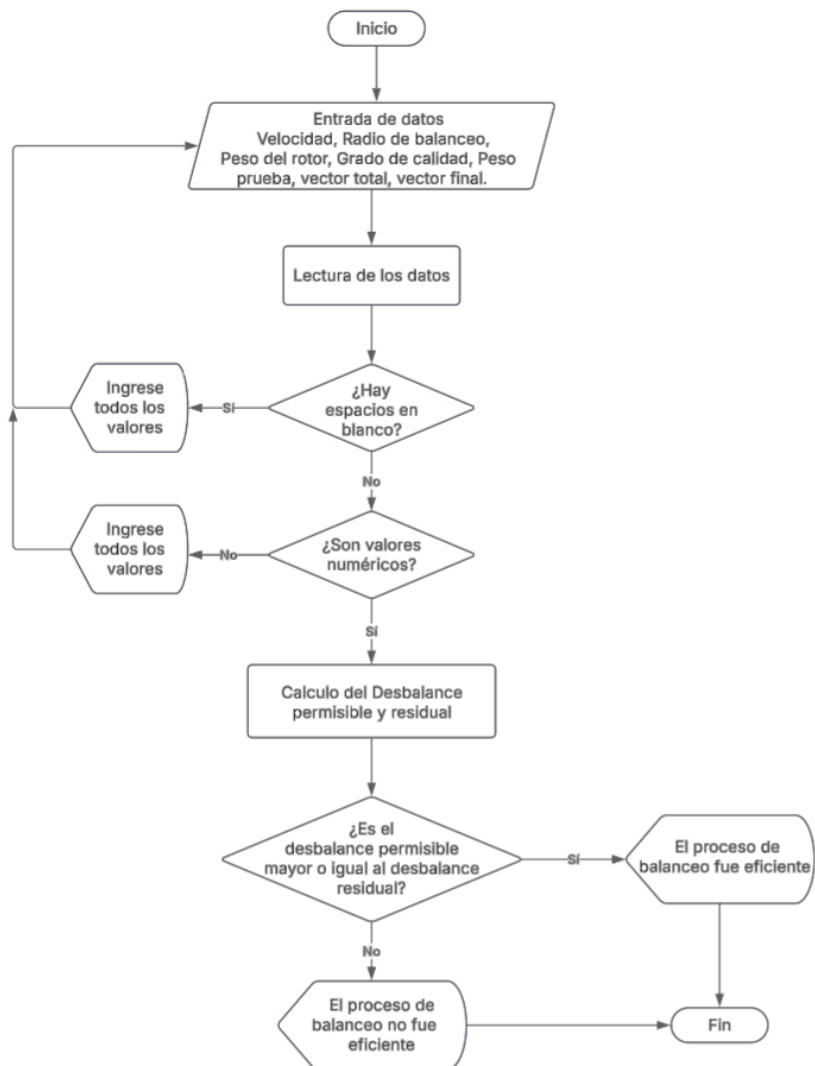
Figura 6-56. Diagrama de flujo módulo de división de pesos.

6.2.3. Lógica de programación módulo de verificación.

El tercer módulo correspondiente a la verificación es el encargado de verificar la efectividad del proceso de balanceo basados en la norma ISO 21940-11, por medio de método de grados de calidad, esta verificación se realiza comparando el desbalance residual con respecto a el desbalance permisible, el cual depende del tipo de equipo. Las variables de entrada muestran en la siguiente tabla. Por otro lado, la lógica de programación utilizada en el módulo se ilustra en la **Figura 6-57**.

Tabla 6-17. Variables de entrada y salida del módulo de verificación.

Entrada	Salida
Velocidad de balanceo Radio de balanceo Peso del rotor Grado de calidad Peso prueba Magnitud vector total Magnitud vector final	Desbalance residual Desbalance permisible

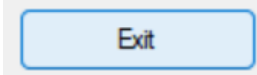
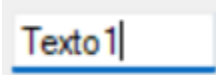
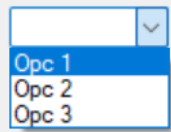
Figura 6-57. Diagrama de flujo módulo de verificación.

6.3. DISEÑO

El diseño gráfico de las interfaces se desarrolla a partir de prototipos, los cuales permiten definir la disposición y funcionalidad de los controles que serán implementados. Esta metodología facilita la estructuración del diseño y proporciona una guía clara para la posterior fase de programación, asegurando coherencia y eficiencia en la implementación de la interfaz.

Los controles utilizados en este aplicativo se numeran y describen de manera general en la **Tabla 6-18**. [21]

Tabla 6-18. Controles utilizados

Control	Descripción	Imagen
Button	Botón de pulsación	
Label	Etiqueta de literal	
TextBox	Cuadro de texto	
ComboBox	Lista de valores desplegable y cuadro de texto	
PictureBox	Permite la visualización de imágenes	
Panel	Posibilita la organización de los elementos	

6.3.1. Diseño módulo de balanceo.

En la **Figura 6-58** se presenta el prototipo o boceto de la ventana principal, mientras que en la **Figura 6-59** se muestra su versión final. Los botones son los encargados de mostrar el panel del proceso seleccionado, bien sea balanceo, división de peso o verificación.

Figura 6-58. Boceto ventana principal.

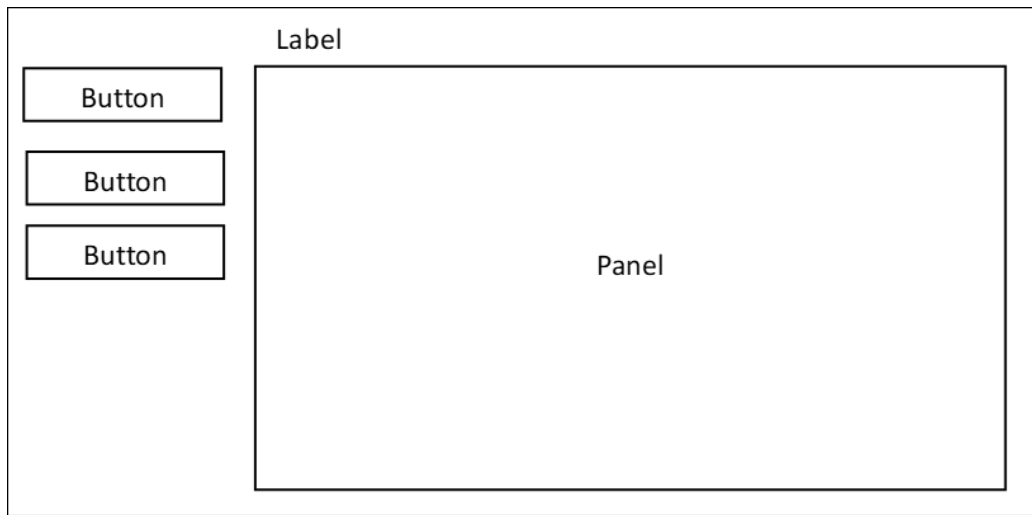
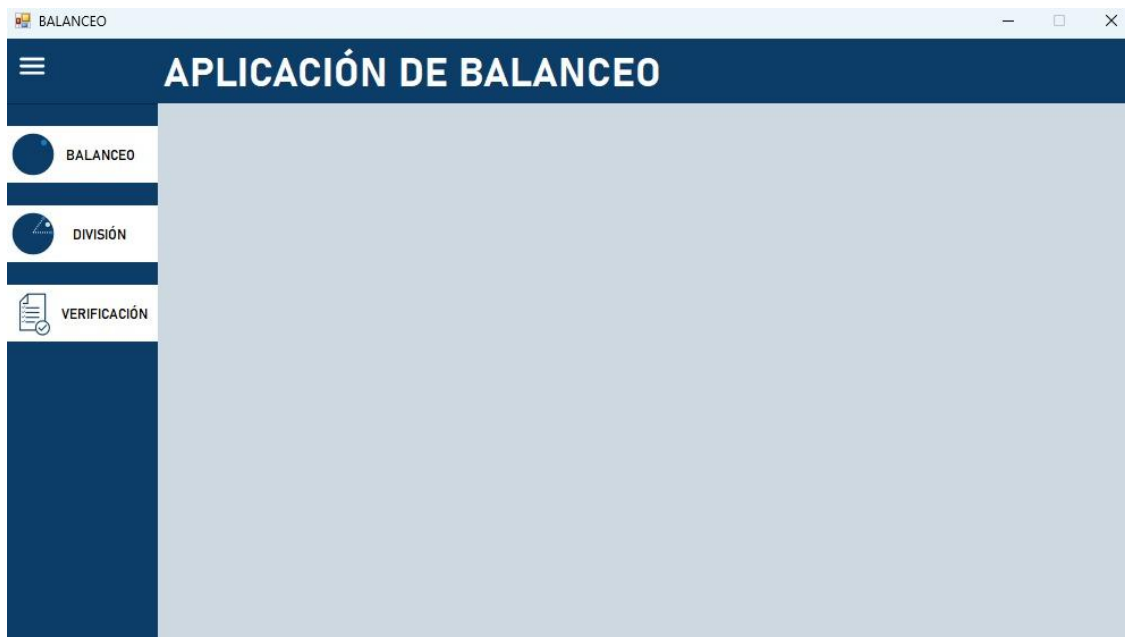


Figura 6-59. Resultado de ventana principal.



El panel del módulo de balanceo se divide en tres secciones. La composición de la sección superior izquierda (Panel 1, **Figura 6-60**) varía según la etapa del proceso en la que se encuentre; el panel 2 es el encargado de mostrar la respuesta del peso de corrección y ubicación de este, por otro lado, el panel 3 dibuja el diagrama polar y vectores basado en los datos ingresados.

Figura 6-60. Boceto interfaz módulo balanceo.

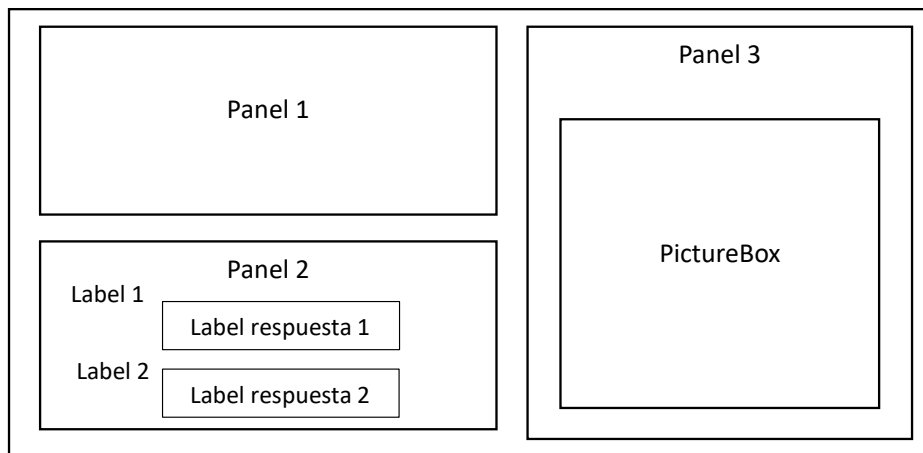
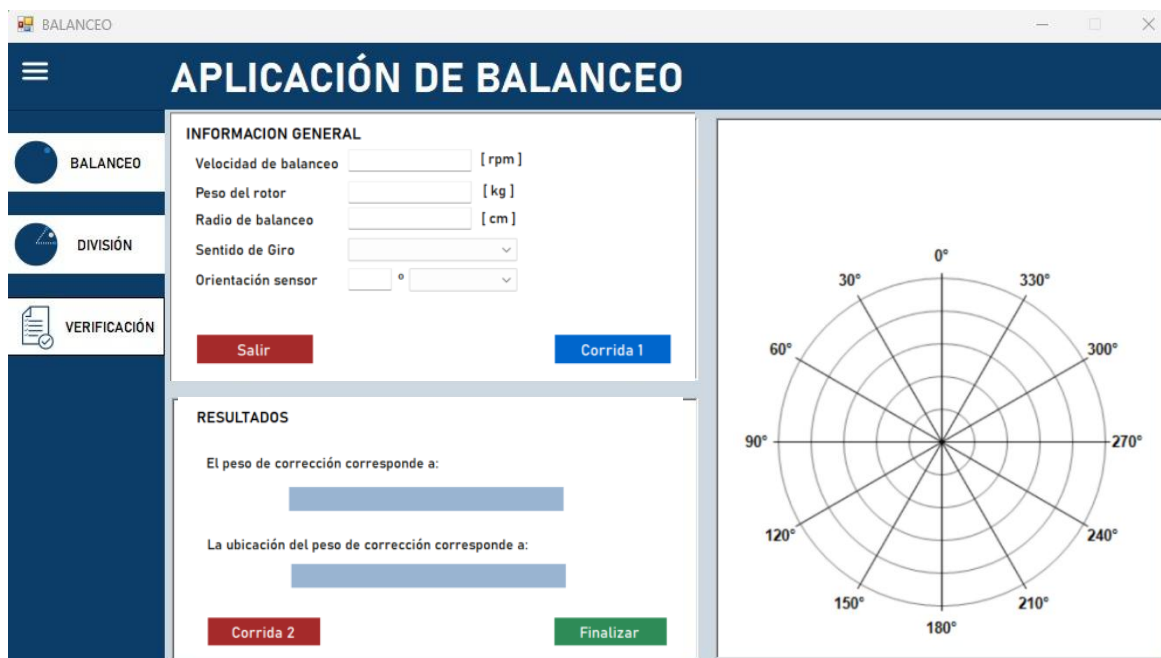


Figura 6-61. Resultado interfaz módulo de balanceo.



Como se mencionó anteriormente, la composición del **Panel 1** varía según la etapa del proceso de balanceo. En la primera etapa, se presenta información general donde se ingresan datos fundamentales para el cálculo del peso de calibración, como la velocidad de balanceo, el peso del rotor y el radio de balanceo. Además, se define el sentido de giro y la orientación del sensor o transductor, parámetros esenciales para la representación del diagrama polar, el boceto y resultado de este panel de ilustra en la **Figura 6-62** y **Figura 6-63**.

Figura 6-62. Boceto panel 1 en etapa 1 del módulo de balanceo.

Diagrama de boceto del Panel 1:

- Label 1
- Label 2: TextBox2, Unidad label 2
- Label 3: TextBox3, Unidad label 3
- Label 4: TextBox4, Unidad label 4
- Label 6: ComboBox1
- Label 7: TextBox5, Unidad label 7, ComboBox2
- Button 1
- Button 2

Figura 6-63. Resultado final panel 1 en etapa 1 del módulo de balanceo.

Panel final de INFORMACION GENERAL:

- Velocidad de balanceo: [rpm]
- Peso del rotor: [kg]
- Radio de balanceo: [cm]
- Sentido de Giro: ▼
- Orientación sensor: ° ▼
- Botones: Salir, Corrida 1

La **segunda etapa** corresponde a el ingreso del vector original de desbalance obtenido en la primera corrida, se ingresa tanto amplitud como fase. Cabe resaltar que es posible moverse entre etapas, si es necesario cambiar alguna información ingresada anteriormente.

Figura 6-64. Boceto panel 1 en etapa 2 del módulo de balanceo.

Diagrama de boceto de un panel de usuario:

- Label 1 (encabezado)
- Label 2 (etiqueta para TextBox1)
- TextBox1 (campo de entrada)
- Label 3 (etiqueta para TextBox2)
- TextBox2 (campo de entrada)
- Unidad label 3 (etiqueta para la unidad)
- Button 1 (botón de acción)
- Button 2 (botón de acción)

Figura 6-65. Resultado final panel 1 en etapa 2 del módulo de balanceo.

Diagrama de resultado final del panel de usuario:

- Título: **CORRIDA 1 Desbalance Original**
- Amplitud (etiqueta) y campo de entrada
- Fase (etiqueta) y campo de entrada
- Botón **Volver** (rojo)
- Botón **Corrida 2** (azul)

Por último, en la **tercera etapa** se muestra el peso de calibración sugerido. Sin embargo, se solicita al usuario ingresar este valor manualmente y posición, ya que puede optar por utilizar un peso diferente. Asimismo, en esta etapa se registra la amplitud y dirección del vector total el cual es la respuesta al peso prueba instalado.

Figura 6-66. Boceto panel 1 etapa 3 del módulo de balanceo.

The wireframe shows a rectangular panel with the following elements:

- Label 1**: Located at the top left.
- Label 2**: A long horizontal label centered below Label 1.
- Label 3**: Located to the left of **TextBox1**.
- Label 4**: Located to the left of **TextBox2**.
- Unidad label 4**: Located to the right of **TextBox2**.
- Label 5**: Located below Label 3.
- Label 6**: Located to the left of **TextBox3**.
- Label 7**: Located to the left of **TextBox4**.
- Unidad label 7**: Located to the right of **TextBox4**.
- Button 1**: A rectangular button at the bottom left.
- Button 2**: A rectangular button at the bottom right.

Figura 6-67. Resultado final panel 1 etapa 3 del módulo de balanceo.

The final design of the panel is titled **CORRIDA 2 Desbalance Total** and includes the following components:

- A blue header bar.
- Peso de calibración**: A text label followed by an input field.
- Ubicación peso de calibración**: A text label followed by an input field with a degree symbol (°) as a suffix.
- Respuesta al Peso de Calibración:**: A section header.
- Amplitud**: A text label followed by an input field.
- Fase**: A text label followed by an input field with a degree symbol (°) as a suffix.
- Volver**: A red button at the bottom left.
- Calcular**: A blue button at the bottom right.

6.3.2. Diseño módulo de división de peso

Como se mencionó en la **sección 6.2.2** el módulo de división de peso se encarga de redistribuir la masa de corrección cuando no es posible instalarla en la dirección calculada por diversas razones. Su diseño consta de dos paneles: el primero, destinado a la entrada de datos, y el segundo, que muestra la respuesta tras la validación de la información. Este último incluye dos etiquetas que indican los valores de peso a instalar en los dos ángulos disponibles ingresados.

Figura 6-68. Boceto Módulo de división de peso.

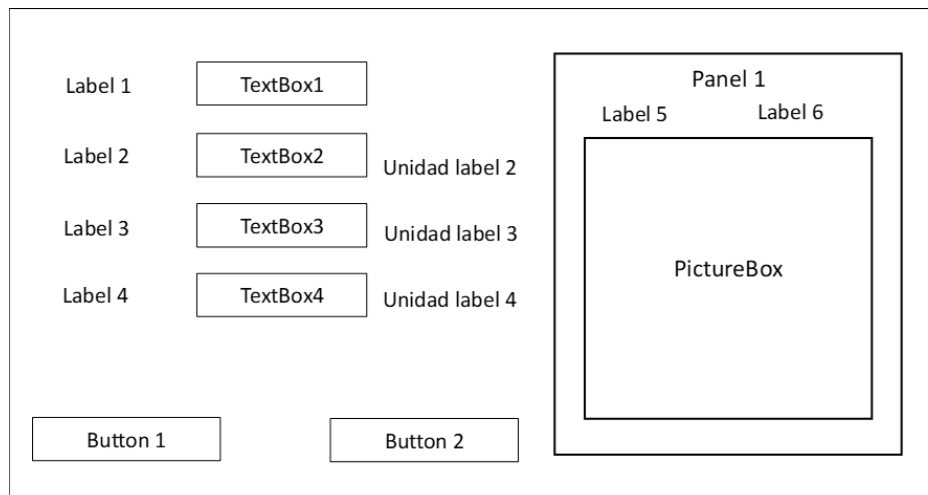
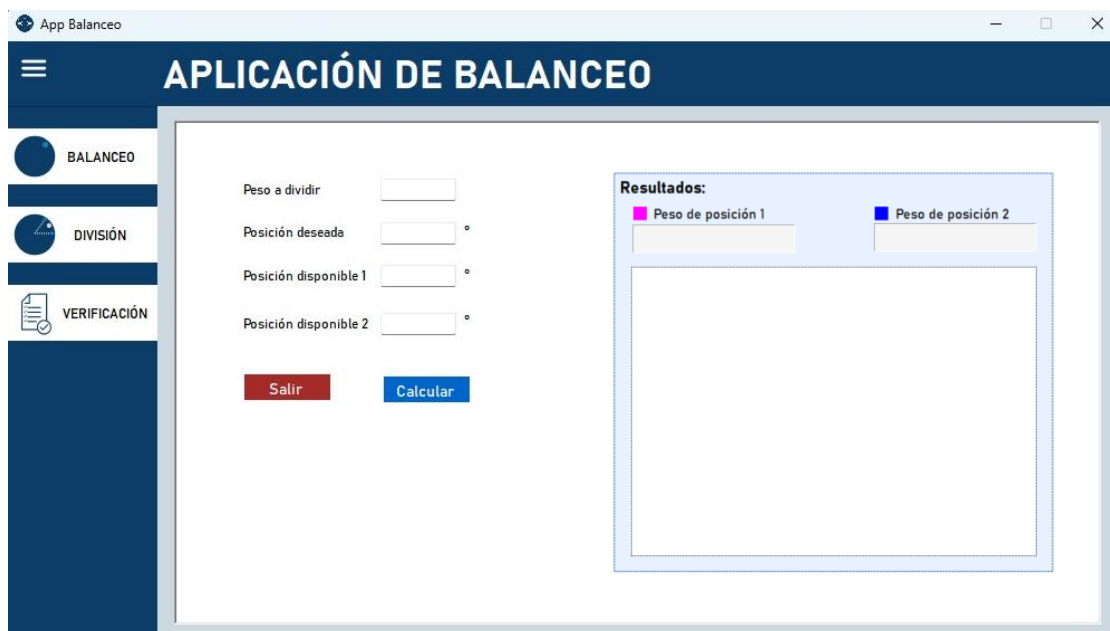


Figura 6-69. Resultado final módulo de división de peso.



6.3.3. Diseño módulo de verificación

Para finalizar el diseño de la aplicación, el módulo de balanceo se divide en 2 paneles, el primero es el encargado de la entrada y validación de los datos, tanto del proceso de balanceo como del equipo, una vez ingresados los datos correctamente se habilita el segundo panel, encargado de mostrar los resultados de la verificación, este panel indica si el proceso de balanceo fue o no efectivo según la norma.

Figura 6-70. Boceto Módulo de verificación.

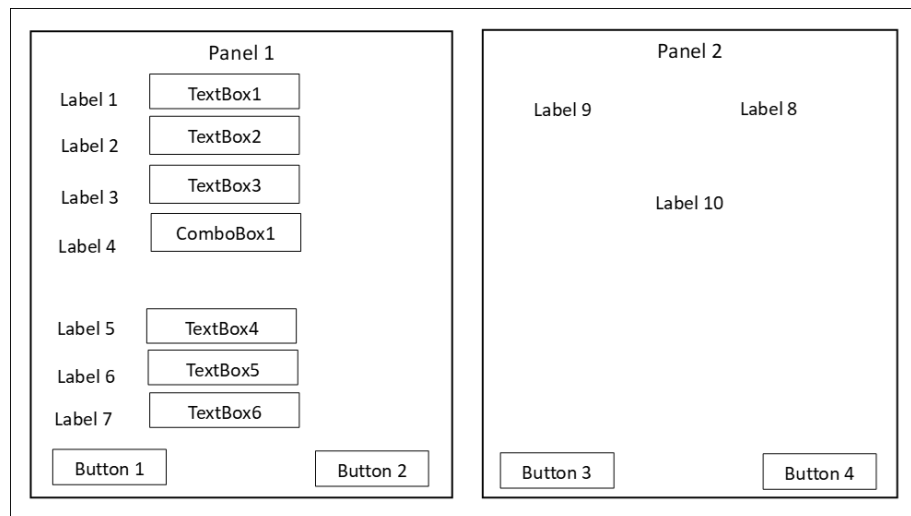
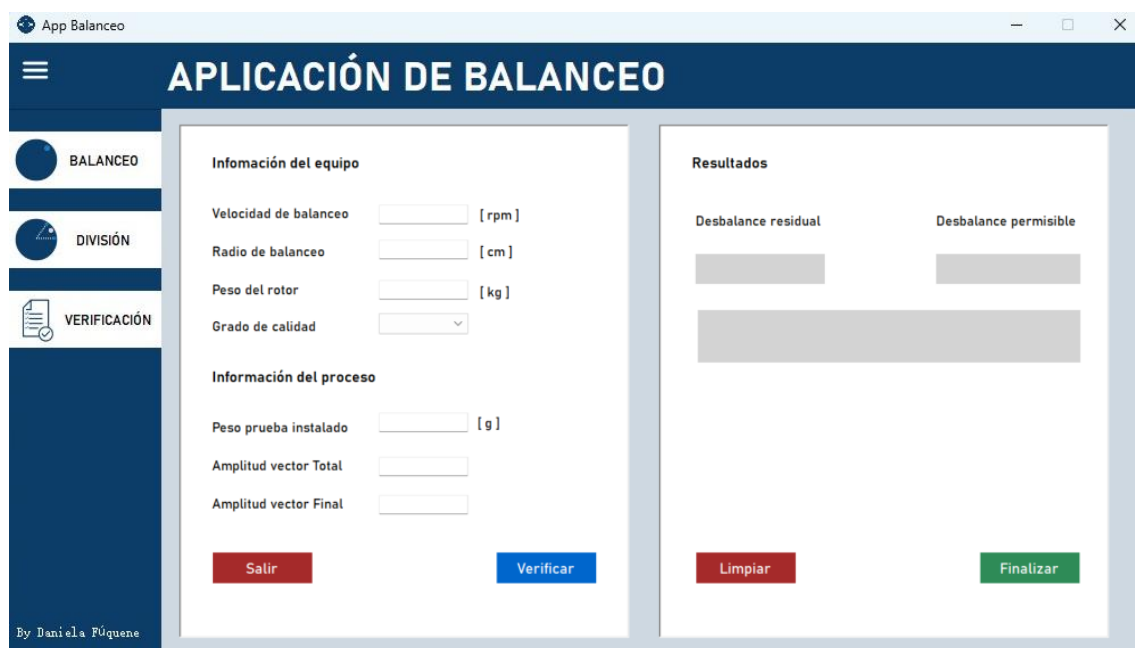


Figura 6-71. Resultado final módulo de verificación.



6.4. RESULTADOS

Se realizaron diferentes pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del aplicativo y las respuestas correctas, para la prueba teórica del módulo de balanceo y división de pesos se utilizaron los ejemplos 3 y 5 del capítulo 16 del libro *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics* de Donal Bently respectivamente; [14] para la prueba real con el rotor kit se ejecutaron diferentes ejercicios, sin embargo, se registran 2 de ellas en el módulo de balanceo. Por otro lado, para la verificación del proceso se usa el ejemplo expuesto en la sección 6.1.3.1.

6.4.1. Resultado y prueba módulo de balanceo

Prueba teórica:

La velocidad del balanceo corresponde a 3000 rpm con un sentido horario. El rotor tiene una masa de 1000 kg y un radio de balanceo disponible de 250 mm. Por otro lado, el sensor utilizado para el balanceo está ubicado a 45° a la derecha del eje vertical (0°). La siguiente tabla contiene las variables del proceso:

Tabla 6-19. Valores ejercicio prueba módulo de balanceo.

Variable	Amplitud	Fase [°]
Vector original	80 [um]	125
Peso de calibración	40 [gr]	135
Vector total	50 [um]	155

Lo primero es ingresar la información general de rotor, giro y ubicación del sensor.

Figura 6-72. Ingreso de información general del proceso al módulo.

The screenshot shows a web application titled 'APLICACIÓN DE BALANCEO'. On the left is a dark blue sidebar with a menu icon and three items: 'BALANCEO' (selected), 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN'. The main content area has a white background with a form titled 'INFORMACION GENERAL'. The form contains the following fields: 'Velocidad de balanceo' (3000 [rpm]), 'Peso del rotor' (1000 [kg]), 'Radio de balanceo' (25 [cm]), 'Sentido de Giro' (Horario), and 'Orientación sensor' (45 ° Derecha). At the bottom of the form are two buttons: 'Salir' (red) and 'Corrida 1' (blue). The footer of the sidebar says 'By Daniela Fúquene'.

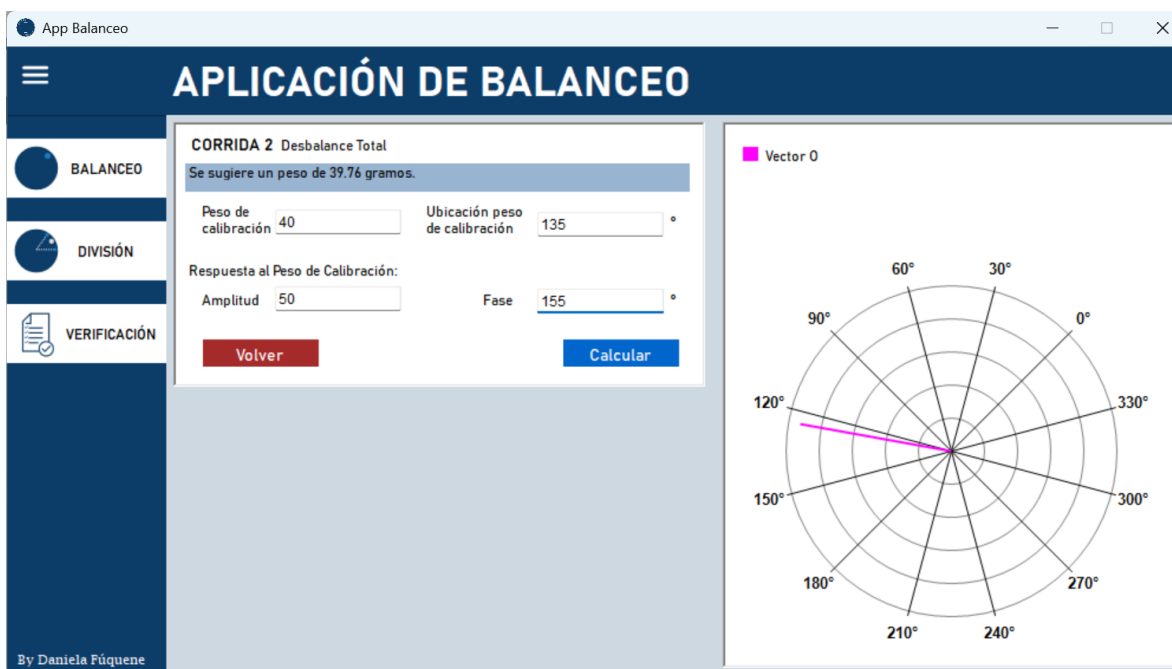
Luego, se ingresa el vector original obtenido en la primera corrida.

Figura 6-73. Ingreso de amplitud y dirección del vector original.

The screenshot shows the same web application, but now the form is titled 'CORRIDA 1 Desbalance Original'. It contains two input fields: 'Amplitud' (80) and 'Fase' (125 °). Below these are two buttons: 'Volver' (red) and 'Corrida 2' (blue). To the right of the form is a large polar plot with concentric circles and radial lines labeled from 0° to 330° in 30° increments. The footer of the sidebar remains 'By Daniela Fúquene'.

En el panel de la segunda etapa o corrida 2, se muestra el peso de calibración sugerido en gramos, el usuario decide si colocar dicho peso o uno diferente, se debe ingresar el peso de calibración puesto finalmente y su ubicación basada en el transductor. También se ingresa el vector Total debido a la respuesta del rotor por el peso instalado.

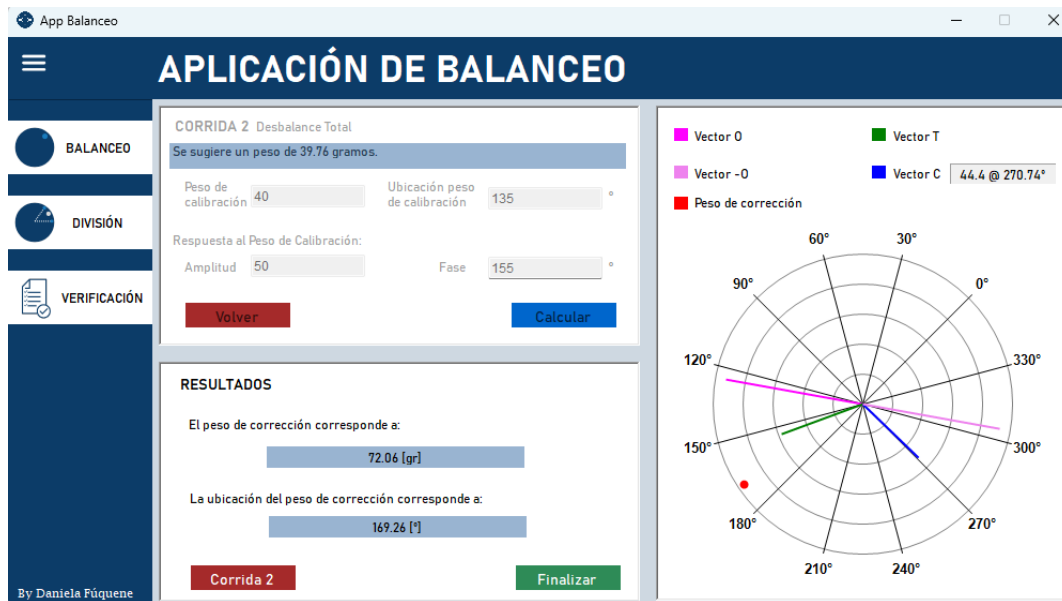
Figura 6-74. Ingreso peso de calibración y vector total.



Por último, al dar click en el botón “calcular” se muestran los resultados del peso de corrección y ubicación basado en los datos ingresados. En el ejemplo del libro, el resultado de este proceso gráfico es de:

$$m = 71 \text{ g } \angle 170^\circ$$

El resultado obtenido con el módulo corresponde a $m = 72.06 \text{ g } \angle 169.26^\circ$ (Vea **Figura 6-75**), se observa una ligera desviación de 1.06 g con respecto al resultado del libro debido a que el módulo emplea una escala numérica mayor en los cálculos, sin embargo, se evidencia el correcto funcionamiento del módulo. El diagrama polar representa los vectores utilizados en el análisis, permitiendo al usuario visualizar el comportamiento del rotor durante el proceso. Además, ilustra la ubicación del peso de corrección para facilitar su identificación.

Figura 6-75. Resultados prueba módulo de balanceo.

Una vez obtenidos los resultados, el usuario tiene la opción de regresar al proceso o finalizarlo, en respuesta a una de las sugerencias planteadas por los clientes. Al presionar el botón “Finalizar”, el sistema solicita confirmar si se desea guardar los datos utilizados. En caso afirmativo, se genera automáticamente un informe en formato PDF que contiene todas las variables y valores empleados en los cálculos (Observe la **Figura 6-76**). Adicionalmente, los datos también se exportan en formato .CSV como se observa en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., lo que permite al usuario acceder a los valores exactos o utilizarlos fácilmente para la elaboración de gráficos u otros análisis. En el caso de que la respuesta sea negativa, todos los datos ingresados al módulo se eliminan.

Figura 6-76. Informe balanceo .pdf.

INFORME BALANCEO

A continuación se presentan los datos utilizados y de respuesta en el proceso de balanceo realizado el 18 - 07 - 2025 sobre las 07 : 32.

Información general

Parámetro	Valor
Velocidad de Balanceo	3000.00 rpm
Peso del rotor	1000.00 kg
Radio de balanceo	25.00 cm
Sentido de giro	Horario
Orientación sensor (plano)	45,00° hacia Derecha

Vectores

Vector / Peso	Amplitud / Peso	Fase / Ubicación
Vector original de desbalance	80.00	125.00°
Peso de calibración	40.00 g	135.00°
Vector total (respuesta)	50.00	155.00°
Vector resultante C	44.40	270.74°
Peso de corrección sugerido	72.06 g	169.26°

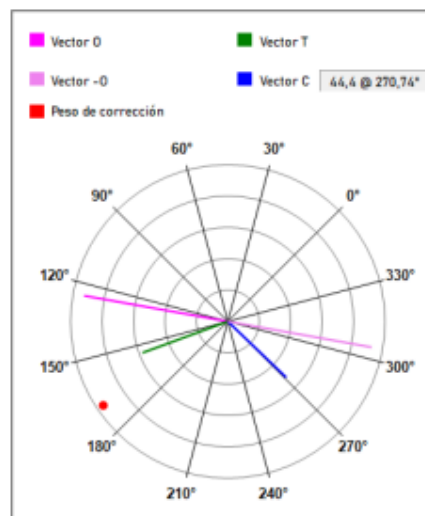


Tabla 6-20. Valores datos balanceo .csv.

	A	B	C
1	Parámetro	Valor	Unidad
2	Velocidad de Balanceo	3000	rpm
3	Peso del Rotor	1000	kg
4	Radio de Balanceo	25	cm
5	Sentido de Giro	Horario	
6	Orientación sensor	45	hacia Derecha
7	Vector Original Amplitud	80	
8	Vector Original Fase	125 °	
9	Peso de Calibración	40	g
10	Fase Peso de Calibración	135 °	
11	Vector Total Amplitud	50	
12	Vector Total Fase	155 °	
13	Vector Resultante Amplitud	44,40491831	
14	Vector Resultante Fase	270,7364289 °	
15	Peso de Corrección	72,06408934	g
16	Fase de Corrección	169,2635711 °	

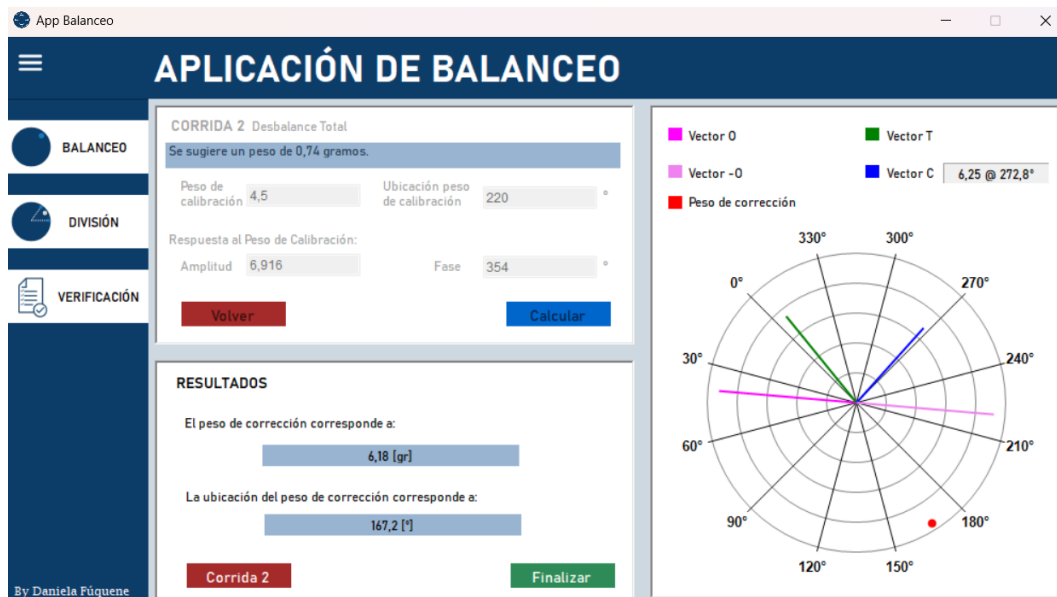
Prueba Rotorkit 1:

La velocidad del balanceo corresponde a 1800 rpm con un sentido horario. El rotor tiene una masa de 800 gramos y un radio de balanceo disponible de 3 cm. La siguiente tabla ilustra los valores de vibración 1XRPM obtenidos en la primera puesta en marcha.

Tabla 6-21. Resultados corrida 1 – Prueba 1 rotorkit.

Sensor	Amplitud	Fase [°]
1YD DE	5.95[mil pp]	51
1XD DE	5.831 [mil pp]	154
2YD NDE	8.581 [mil pp]	40
2XD NDE	5.571 [mil pp]	172

De acuerdo con la tabla anterior, se selecciona el sensor 2YD, y se toma el valor del vector original como $O = 8.581 \text{ mil pp } \angle 40^\circ$; luego, se ubica una masa de calibración correspondiente a $m_{cal} = 4.5 \text{ g } \angle 220^\circ$ del sensor seleccionado, por último, se procede a realizar la segunda puesta, obteniendo el valor del vector total de $T = 6.916 \text{ mil pp } \angle 354^\circ$. Se ingresan los datos correspondientes en la aplicación y se obtiene que:

Figura 6-77. Resultado peso de corrección- Prueba 1 rotorkit.

El aplicativo sugiere un valor de peso de corrección de 6.18 gramos ubicado a 167.2° del sensor 2YD, por disponibilidad de los agujeros, se instala el peso de corrección calculado a 157.5° , se procede a hacer la tercera corrida (una vez quitado la masa de calibración), para verificar la disminución de la vibración y se registran los siguientes valores:

Tabla 6-22. Resultados vibración después de balanceo – Prueba 1 rotorkit.

Sensor	Amplitud	Fase [°]
1YD DE	0.906 [mil pp]	313
1XD DE	0.404 [mil pp]	265
2YD NDE	0.773 [mil pp]	44
2XD NDE	1.036 [mil pp]	87

La vibración en el plano de balanceo 2YD experimentó una reducción de ~91%, adicional los demás planos también experimentaron reducciones en la amplitud de vibración, siendo la menor disminución de ~81%, estos valores confirmar la efectividad del balanceo, por ende, la correcta funcionalidad del aplicativo.

Prueba Rotorkit 2:

Con el propósito de verificar nuevamente la precisión y confiabilidad de los resultados dados por la aplicación, se registra una segunda prueba utilizando el equipo *Rotorkit*.

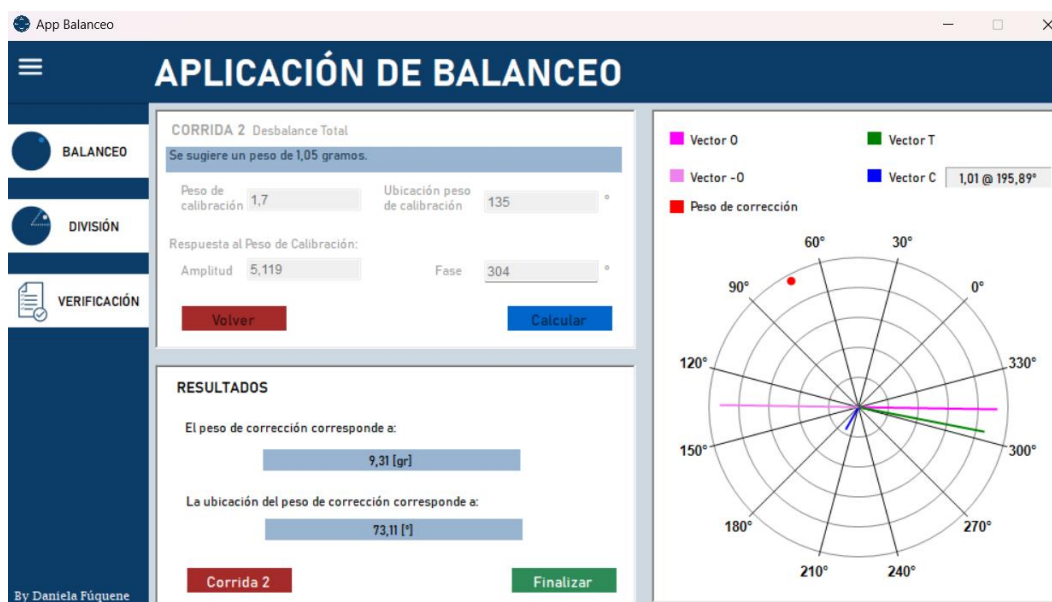
Para esta prueba, la velocidad de operación es de 1600 rpm y se conservan los valores de peso y radio de la prueba anterior. Se realiza la primera corrida y se registran los siguientes resultados de vibración 1X RPM ilustrados en la Tabla 6-23 Resultados corrida 1 – Prueba 2 *rotorkit*. **Tabla 6-23.**

Tabla 6-23 Resultados corrida 1 – Prueba 2 *rotorkit*.

Sensor	Amplitud	Fase [°]
1YD DE	5.292 [mil pp]	188
1XD DE	5.516 [mil pp]	314
2YD NDE	4.511 [mil pp]	178
2XD NDE	2.785 [mil pp]	323

Para el vector original, de acuerdo con los resultados de la primera corrida se selecciona el plano 1XD por su mayor amplitud con respecto a los demás planos $O = 5.516 \text{ mil pp } \angle 314^\circ$. Luego, se instala la masa de calibración de 1.7 gramos a 135° del sensor. Se da puesta en marcha por segunda vez y se registra el valor del vector total $T = 5.119 \text{ mil pp } \angle 304^\circ$. Se ingresan los datos al aplicativo y se obtienen los resultados ilustrados en la **Figura 6-78.**

Figura 6-78. Resultado peso de corrección- Prueba 2 *rotorkit*.



En esta prueba se decide realizar división de peso, teniendo en cuenta que el peso es significativo; los agujeros disponibles cercanos están a 67.5° y 90° , utilizando el módulo de división se obtiene que los pesos respectivos para estas ubicaciones son de 7.07 gr y 2,38. Se procede a instalar los pesos y a poner en marcha por tercera vez el equipo. Los resultados de la tercera corrida se ilustran en la **Tabla 6-24.**

Tabla 6-24. Resultados vibración después de balanceo – Prueba 2 *rotorkit*.

Sensor	Amplitud	Fase [°]
1YD DE	0.601 [mil pp]	291
1XD DE	0.62 [mil pp]	243
2YD NDE	0.927 [mil pp]	73
2XD NDE	0.078 [mil pp]	128

Se registra disminución de la amplitud de vibración 1X RPM en el plano de balanceo 1XD de ~88.7%, en los demás planos también hubo disminución significativa de vibración, siendo la menor de ~79.5%, de este modo se corrobora que el rotor ha sido balanceado de manera efectiva gracias a los resultados obtenidos por la aplicación.

6.4.2. Resultado y prueba módulo de división de peso

El ejercicio de división de peso consta calcular los 2 pesos en la posición de 20° y 90° que generen la respuesta equivalente de colocar un peso de 5 g ubicado originalmente en 42°. Se ingresan los datos en el primer módulo como se observa en la siguiente figura:

Figura 6-79. Ingreso de datos prueba módulo de división.

App Balanceo

APLICACIÓN DE BALANCEO

BALANCEO

DIVISIÓN

VERIFICACIÓN

Peso a dividir: 5

Posición deseada: 42 °

Posición disponible 1: 20 °

Posición disponible 2: 90 °

Salir Calcular

By Daniela Púquene

Luego, se presiona el botón “calcular” el cual se encarga de mostrar el panel de resultados, en este se muestran los pesos correspondientes para la posición 1 (20°) y posición 2 (90°), la ubicación de estos pesos se ilustra en el diagrama polar de una única referencia, en el cual el 0 queda el eje vertical positivo y los grados aumentan en sentido antihorario. Los pesos calculados son:

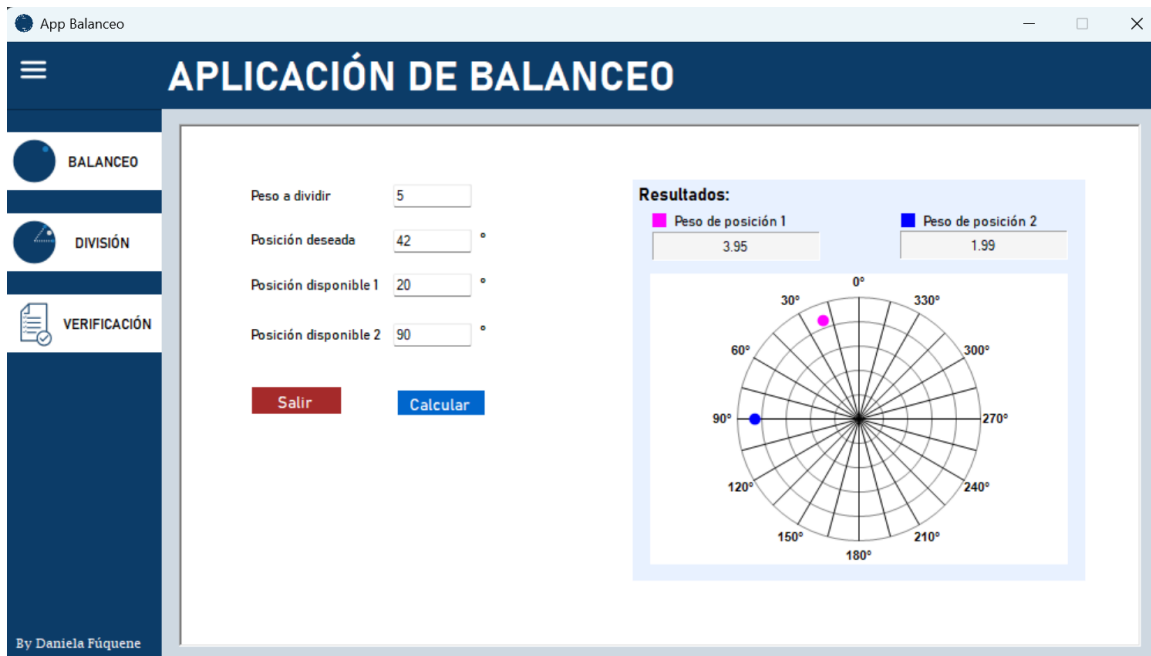
Y,

$$m_1 = 3.95 \text{ g} \angle 20^\circ$$

$$m_2 = 1.99 \text{ g} \angle 90^\circ$$

Estos pesos corresponden a la respuesta dada en el libro de $m_1 = 4 \text{ g}$ y $m_2 = 2 \text{ g}$, de este modo se confirma el correcto funcionamiento de este módulo.

Figura 6-80. Resultados prueba módulo de división.



Al igual que en el módulo anterior, es posible exportar los datos en formato .CSV y generar un informe en PDF. Al presionar el botón “Salir”, el sistema solicitará al usuario confirmar si desea guardar estos datos antes de cerrar el módulo y eliminar las variables ingresadas.

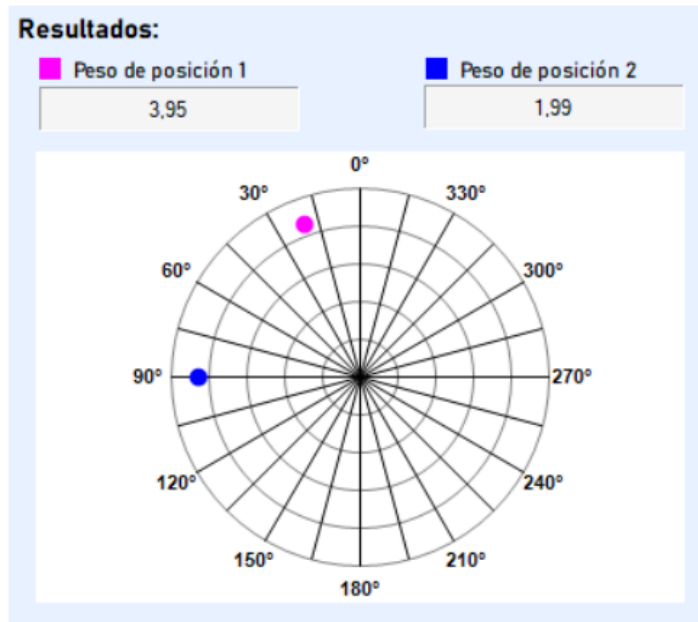
Figura 6-81. Informe módulo de división .pdf.

INFORME DIVISIÓN

A continuación se presentan los datos utilizados y de respuesta en el proceso de división de peso realizado el 18 - 07 - 2025 sobre las 07 : 46.

Datos

Parámetro	Peso	Posición
Masa deseada a dividir	5,00	42,00 °
Masa 1	3,95	20,00°
Masa 2	1,99	90,00°



6.4.3. Resultado y prueba módulo de verificación

Para la comprobación de este módulo, se utilizan las variables del proceso de balanceo ilustradas en la tabla **Tabla 6-12**, el rotor tiene un peso de 3500 kg, su radio de disponibilidad de balanceo es de 112 cm y el proceso se realiza a una velocidad de 900 rpm.

Ingresando los datos al primer panel y presionando el botón “Verificar” se obtienen los valores de desbalance residual y permisible.

Figura 6-82. Ingreso de datos en módulo de verificación.

En este caso se obtiene que el desbalance residual es menor al desbalance permisible, esto traduce que el balanceo fue efectivo y los valores coinciden con los calculados en la sección **6.1.3.1**.

$$U_{res} = 92427.51 \text{ g mm}$$

Y

$$U_{per} = 233957.77 \text{ g mm}$$

Por lo tanto,

$$92427.51 \text{ g mm} \leq 233957.77 \text{ g mm}$$

Figura 6-83. Resultados prueba de módulo de verificación.

App Balanceo

APLICACIÓN DE BALANCEO

- BALANCEO
- DIVISIÓN
- VERIFICACIÓN

Información del equipo

Velocidad de balanceo: 900 [rpm]

Radio de balanceo: 112 [cm]

Peso del rotor: 3500 [kg]

Grado de calidad: G 6.3

Información del proceso

Peso prueba instalado: 345.12 [g]

Amplitud vector Total: 9.075

Amplitud vector Final: 2.17

Resultados

Desbalance residual: 92427.51 g mm

Desbalance permisible: 233957.77 g mm

El proceso de balanceo fue efectivo, el desbalance residual no supera el desbalance permisible

By Daniela Fúquene

Finalmente, al presionar el botón “Finalizar”, el sistema solicita al usuario confirmar si desea guardar los datos utilizados durante el proceso al igual que en los demás módulos. En caso de una respuesta afirmativa, se genera automáticamente un informe en formato PDF que incluye todas las variables y resultados obtenidos. Además, se realiza la exportación de los datos en un archivo .CSV, lo cual permite conservar un respaldo de los valores utilizados y facilita su análisis posterior de ser necesario.

Figura 6-84. Informe módulo de verificación .pdf.

INFORME VERIFICACIÓN

A continuación se presentan los datos utilizados y de respuesta en el proceso de verificación de balanceo basado en la normativa ISO 21940, realizado el 18 - 07 - 2025 sobre las 07 : 54.

Información general equipo

Parámetro	Valor
Velocidad de balanceo	900,00 rpm
Radio de balanceo	112,00 cm
Peso del rotor	3500,00 kg
Grado de calidad	G 6.3

Información general proceso

Parámetro	Valor
Peso prueba instalado	345,12 g
Amplitud vector total	9,08
Amplitud vector final	2,17

Resultados

Parámetro	Valor
Excentricidad permisible	0,07 g*mm / kg
Sensibilidad	42593,32 g*mm/ unidad de vibración
Desbalance residual	92427,51 g*mm
Desbalance permisible	233957,77 g*mm

Tabla 6-25. Datos módulo de verificación .csv.

	A	B	C
1	Parámetro	Valor	Unidad
2	Velocidad de balanceo	900	rpm
3	Radio de balanceo	112	cm
4	Peso del rotor	3500	kg
5	Grado de calidad	G 6.3	
6	Peso prueba instalado	345,12	g
7	Amplitud vector total	9,075	
8	Amplitud vector final	2,17	
9	Excentricidad permisible	0,066845076	g*mm / kg
10	Sensibilidad	42593,32231	g*mm/ unidad de vibración
11	Desbalance residual	92427,51	g*mm
12	Desbalance permisible	233957,77	g*mm

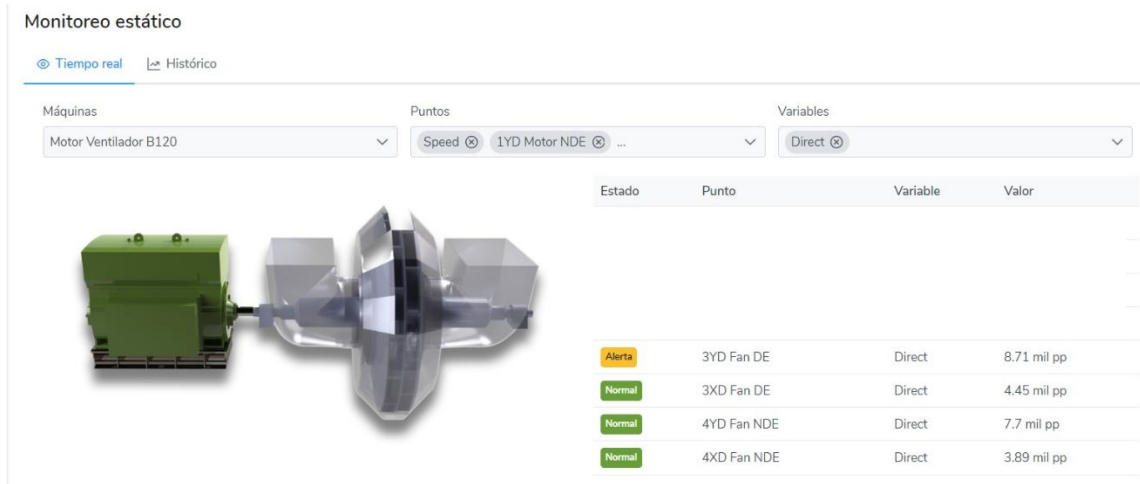
6.4.4. Resultado de proceso de balanceo y verificación en Motoventilador

Una vez realizadas las pruebas con ejercicios teóricos, se realiza un proceso de balanceo en el Motoventilador B120, ubicado en la planta de sinterización de Acerías Paz del río instrumentado por medio de sensores de proximidad, el balanceo se realiza el proceso de balanceo a la velocidad de operación del equipo de 1759 rpm aproximadamente en sentido horario.

En la primera corrida se obtienen los siguientes resultados de la componente 1X:

Tabla 6-26. Resultados 1X primera corrida

Sensor	Amplitud [mil pp]	Fase [°]
3YD	8.614	8
3XD	3.746	92
4YD	6.792	88
4XD	2.017	216

Figura 6-85. Amplitudes directas antes del balanceo.

Se selecciona el sensor 3YD ya que este tiene la mayor amplitud, este corresponde al vector original. El sensor 3YD está ubicado a 45° hacia la izquierda del centro vertical, visto desde el motor hacia el ventilador.

Figura 6-86. Ingreso de información general del motoventilador

App Balanceo

APLICACIÓN DE BALANCEO

- BALANCEO
- DIVISIÓN
- VERIFICACIÓN

INFORMACION GENERAL

Velocidad de balanceo: 1759 [rpm]

Peso del rotor: 3500 [kg]

Radio de balanceo: 112 [cm]

Sentido de Giro: Horario

Orientación sensor: 45° Izquierda

Salir Corrida 1

By Daniela Fúquene

Figura 6-87. Ingreso del vector original

The screenshot shows a web application titled 'APLICACIÓN DE BALANCEO'. On the left is a sidebar with three menu items: 'BALANCEO' (selected), 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN'. The main content area is titled 'CORRIDA 1 Desbalance Original'. It contains two input fields: 'Amplitud' with the value '8.614' and 'Fase' with the value '8'. Below these are two buttons: 'Volver' (red) and 'Corrida 2' (blue). To the right of the input fields is a polar plot with concentric circles and radial lines labeled from 0° to 330° in 30° increments. The plot is currently empty.

Después de esto, el programa calcula un peso sugerido de 90.35 g, sin embargo, se instala un peso mayor para provocar mayor excitación, esto se decide por el conocimiento del comportamiento del rotor. El peso de calibración o prueba corresponde a:

$$m_{cal} = 180g \angle 116^\circ$$

Una vez instalado el peso prueba se da puesta en marcha nuevamente del rotor, hasta la velocidad de operación, se registran las respuestas en todos los planos, sin embargo, se ingresa el valor del sensor 3YD ya que fue el seleccionado inicialmente.

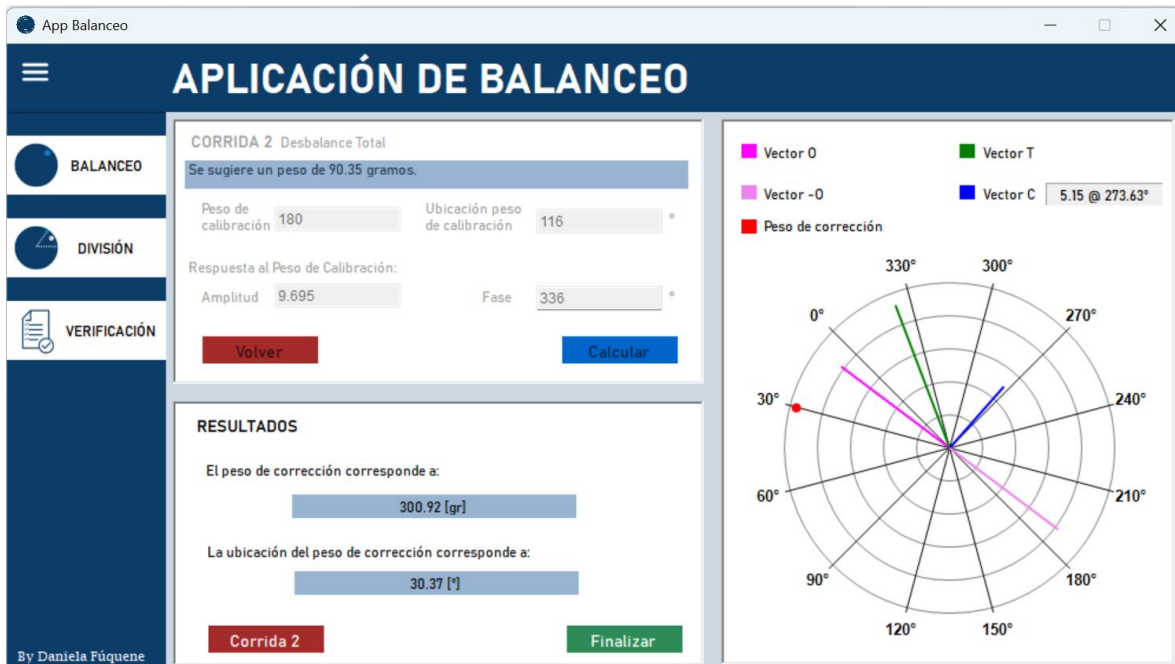
Tabla 6-27. Resultados 1X segunda corrida con peso prueba.

Sensor	Amplitud [mil pp]	Fase [°]
3YD	9.695	336
3XD	4.974	67
4YD	6.077	39
4XD	1.699	165

En el panel de la corrida 2, se ingresa el peso prueba instalado en gramos y la dirección en la que se instaló, con respecto al sensor 3YD; también se digita la

respuesta se obtuvo a este peso, conocido como vector total, en este caso corresponde a $T = 9.695 \text{ mil } \angle 336^\circ$. Por último, se presiona el botón calcular para hallar el peso de corrección y su ubicación.

Figura 6-88. Resultado peso de corrección y dirección.



Después de calcular el peso de corrección, se retira el peso prueba instalado anteriormente y se instala en este caso 314 gr a una dirección de 30° . En este caso, no hay necesidad de realizar división de peso ya que se cuenta con disponibilidad en esa dirección.

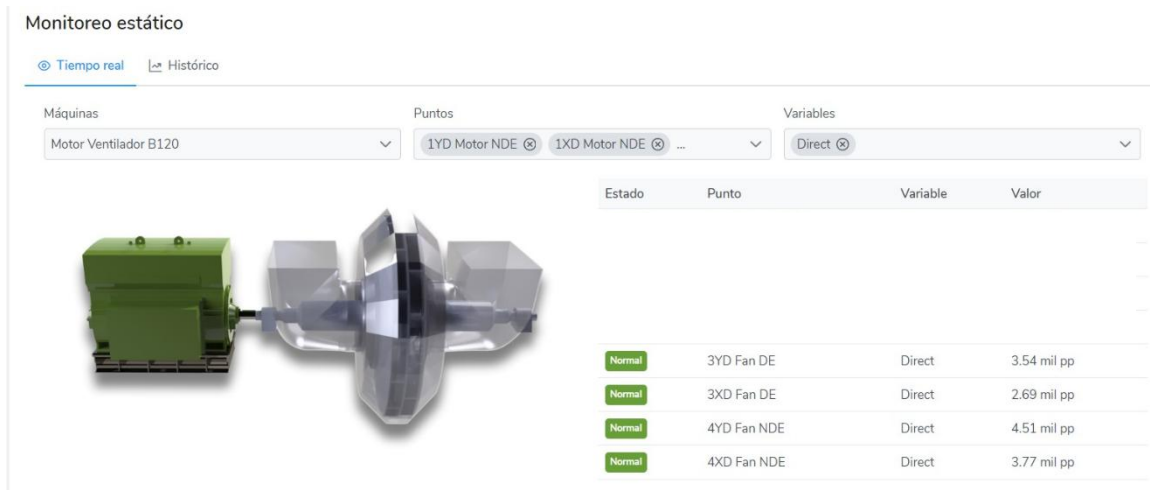
$$m = 314 \text{ gr } \angle 30^\circ$$

Por último, se realiza la tercera corrida de verificación, en esta corrida se espera evidenciar disminución en las vibraciones del equipo. La respuesta obtenida de la componente 1X después del balanceo se muestra en la **Tabla 6-28**, por otro lado, note que las vibraciones directas disminuyeron y el plano 3YD no se encuentra en alarma, la mayor disminución se obtuvo en el plano 3YD del 59.3%, seguido del plano 4YD con 41.4%.

Tabla 6-28. Resultados finales 1X del proceso de balanceo.

Sensor	Amplitud [mil pp]	Fase [°]
3YD	3.033	332
3XD	2.188	43
4YD	3.347	133
4XD	1.356	274

Figura 6-89. Resultados vibraciones directas después del proceso de balanceo.



Para completar la verificación del proceso de balanceo se utiliza el vector final, dado en la tabla anterior por $F = 3.033 \text{ mil pp}$, teniendo en cuenta que el equipo es un ventilador, el grado de calidad corresponde a **G 6.3** basados en la norma ISO 21940.

Se ingresan los datos en el módulo de verificación (vea **Figura 6-90**), da como resultado un desbalance residual de 63068.88 g mm, siendo menor que el desbalance permisible el cual es de 119705.51 g mm, de este modo se considera el proceso de balanceo exitoso y efectivo. (Vea **Figura 6-91**)

Figura 6-90. Ingreso de datos verificación proceso de balanceo.

The screenshot shows a web application titled 'APLICACIÓN DE BALANCEO'. On the left is a sidebar with three menu items: 'BALANCEO', 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN' (which is highlighted). The main content area is divided into two sections: 'Información del equipo' and 'Información del proceso'. The 'Información del equipo' section contains four input fields: 'Velocidad de balanceo' (1759 rpm), 'Radio de balanceo' (112 cm), 'Peso del rotor' (3500 kg), and 'Grado de calidad' (G 6.3). The 'Información del proceso' section contains three input fields: 'Peso prueba instalado' (180 g), 'Amplitud vector Total' (9.695), and 'Amplitud vector Final' (3.033). At the bottom of the form are two buttons: 'Salir' (red) and 'Verificar' (blue). The footer of the sidebar reads 'By Daniela Fúquene'.

Información del equipo	
Velocidad de balanceo	1759 [rpm]
Radio de balanceo	112 [cm]
Peso del rotor	3500 [kg]
Grado de calidad	G 6.3

Información del proceso	
Peso prueba instalado	180 [g]
Amplitud vector Total	9.695
Amplitud vector Final	3.033

Buttons: **Salir** **Verificar**

Figura 6-91. Resultados de verificación proceso de balanceo con ISO 21940.

The screenshot shows the same web application, but now displaying the results of the balancing process. The 'Información del equipo' and 'Información del proceso' sections remain the same as in Figure 6-90. A new section titled 'Resultados' has been added on the right. It displays 'Desbalance residual' as 63068.88 g mm and 'Desbalance permisible' as 119705.51 g mm, with a comparison symbol '<=' between them. Below this, a green box contains the text: 'El proceso de balanceo fue efectivo, el desbalance residual no supera el desbalance permisible'. At the bottom of the results section are two buttons: 'Limpiar' (red) and 'Finalizar' (green). The footer of the sidebar remains 'By Daniela Fúquene'.

Información del equipo	
Velocidad de balanceo	1759 [rpm]
Radio de balanceo	112 [cm]
Peso del rotor	3500 [kg]
Grado de calidad	G 6.3

Información del proceso	
Peso prueba instalado	180 [g]
Amplitud vector Total	9.695
Amplitud vector Final	3.033

Buttons: **Salir** **Verificar**

Resultados	
Desbalance residual	Desbalance permisible
63068.88 g mm	119705.51 g mm
<=	
El proceso de balanceo fue efectivo, el desbalance residual no supera el desbalance permisible	

Buttons: **Limpiar** **Finalizar**

Los elevados niveles de desbalance presentes en este equipo generaban un desgaste acelerado en los cojinetes y elementos de apoyo del ventilador, como consecuencia directa de la distribución no uniforme de masa, provocada principalmente por el deterioro del material del rotor. Antes de implementar el sistema de monitoreo en línea y del desarrollo del aplicativo, el proceso de balanceo se realizaba de forma empírica y completamente manual, lo cual incrementaba la probabilidad de errores, afectaba la precisión del procedimiento y aumentaba los riesgos operacionales.

Con la implementación del software desarrollado, en conjunto con buenas prácticas de balanceo basadas en análisis vectorial y la adquisición de señales en tiempo real, fue posible optimizar el proceso de corrección de masas y garantizar un mayor nivel de precisión en la intervención. Como resultado, se logró extender significativamente la vida útil de los elementos de apoyo del ventilador. Anteriormente, estos componentes requerían ser reemplazados en un promedio de cada **3 a 4 meses** debido al desgaste prematuro (**Figura 6-92**). Sin embargo, tras la implementación del proceso de balanceo asistido por el aplicativo, el intervalo de reemplazo se extendió hasta **10 meses (Figura 6-94)**, representando un incremento del **150 % en la vida útil de los componentes**.

Además, esta mejora implicó una **reducción del 65 % en la frecuencia de mantenimientos correctivos relacionados con desgaste por desbalance**, lo que a su vez se traduce en una disminución significativa en los costos de mantenimiento y paradas no programadas. Este resultado demuestra la efectividad del programa, no solo como herramienta funcional para el análisis y corrección del desbalance, sino como un **aporte tangible a la confiabilidad** operativa y la gestión eficiente del mantenimiento predictivo.

Figura 6-92. Estado cambio de cojinetes ANTES de implementación de monitoreo y software balanceo.

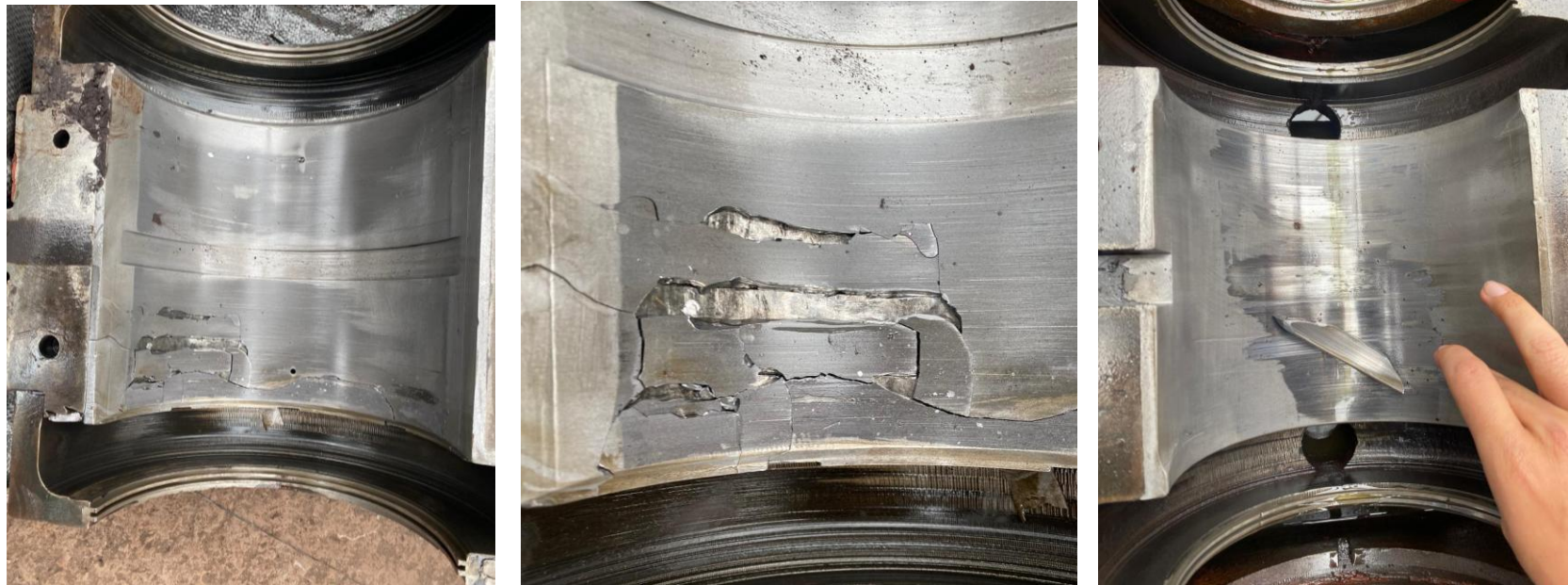


Figura 6-93. Estado cambio de cojinetes CON implementación de monitoreo, pero NO software balanceo.

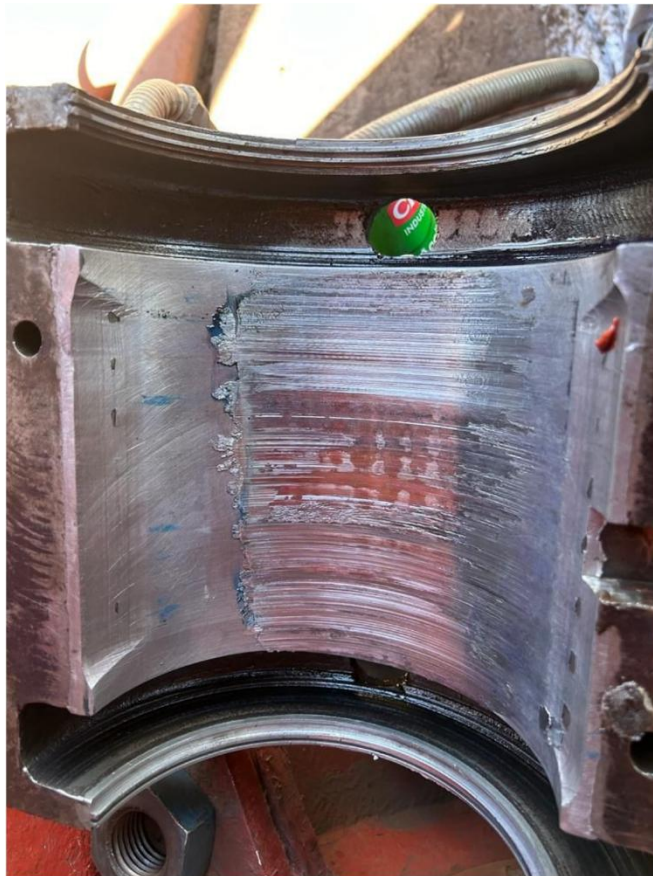


Figura 6-94. Estado cambio de cojinetes CON implementación de monitoreo y software balanceo.

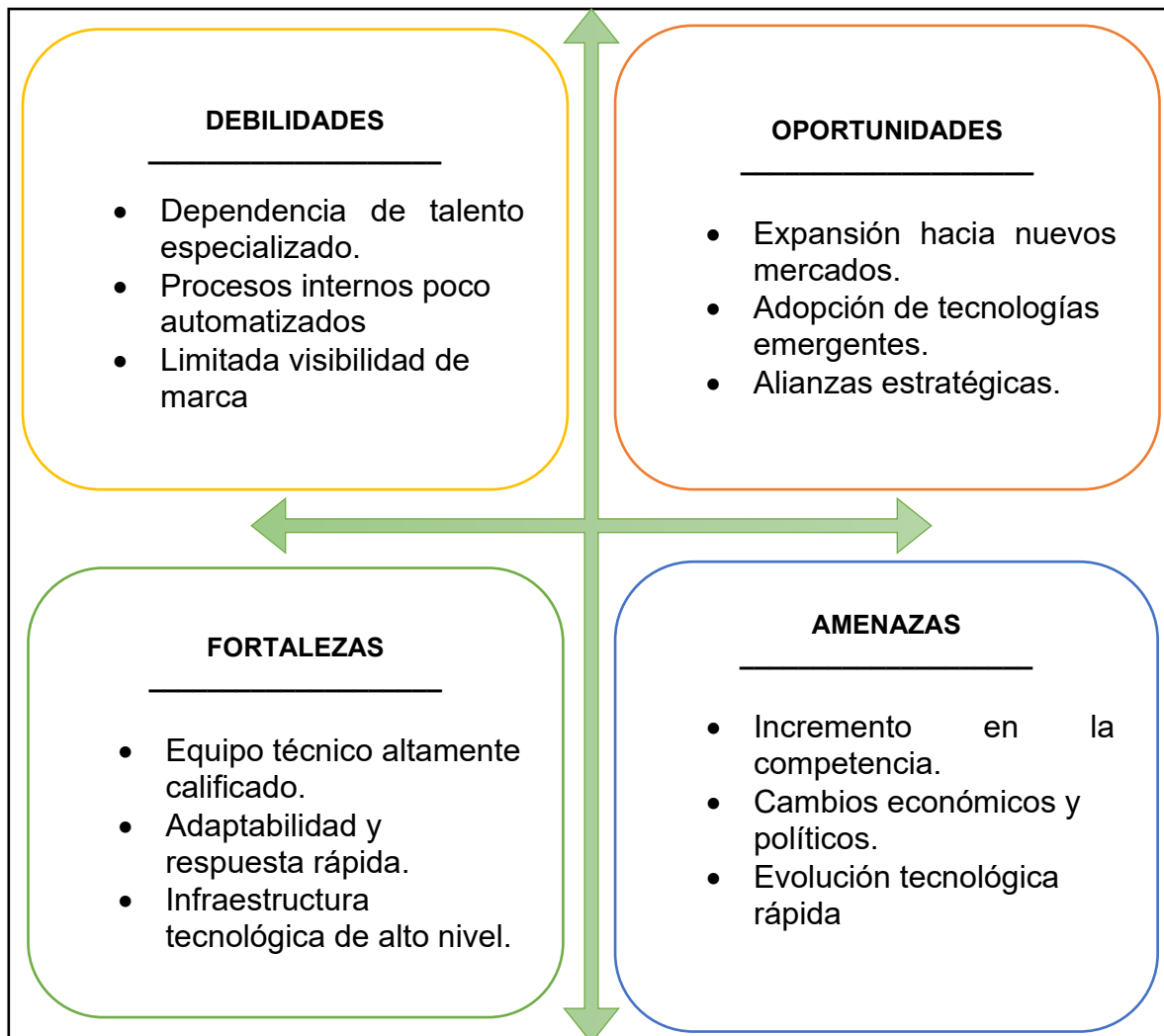


7. ANÁLISIS DOFA

7.1. ANÁLISIS EMPRESA

A continuación, se presenta un análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) centrado en la empresa SIGA S.A.S. y su entorno, con un enfoque estratégico en los factores internos y externos que pueden influir en su desarrollo y crecimiento.

Figura 7-1. Análisis DOFA Empresa SIGA SAS.



7.1.1. Debilidades

- Dependencia de talento especializado: La empresa se enfrenta a un desafío debido a la escasez de personal altamente capacitado en análisis de vibraciones

y mantenimiento predictivo. La falta de profesionales en este campo podría impactar negativamente en la calidad de los servicios y en la rapidez de respuesta.

- Procesos internos poco automatizados: Procesos internos poco automatizados: Algunos de los procesos administrativos y operativos todavía dependen de métodos manuales, lo que genera ineficiencias y aumenta el riesgo de errores humanos. Implementar más automatización podría mejorar significativamente el rendimiento operativo. Implementar tecnologías como *SAP*.
- Limitada visibilidad de marca: A pesar de su experiencia en el sector, SIGA S.A.S. aún no ha logrado establecer una presencia de marca sólida en el mercado, tanto a nivel nacional como internacional, lo que podría frenar su crecimiento y la captación de nuevos clientes.

7.1.2. Oportunidades

- Expansión hacia nuevos mercados: La creciente demanda de servicios especializados de mantenimiento en sectores como energías renovables y manufactura presenta una gran oportunidad para que SIGA S.A.S. diversifique su cartera de clientes.
- Adopción de tecnologías emergentes: Integrar herramientas avanzadas de inteligencia artificial (*IA*) y *machine learning* en el análisis de vibraciones podría permitir ofrecer diagnósticos más precisos y soluciones predictivas más efectivas.
- Alianzas estratégicas: La posibilidad de formar alianzas con fabricantes de maquinaria y empresas tecnológicas podría mejorar el acceso de SIGA S.A.S. a nuevas herramientas y plataformas, fortaleciendo así su capacidad técnica.

7.1.3. Fortalezas

- Equipo técnico altamente calificado: SIGA S.A.S. cuenta con un equipo de ingenieros especializados en análisis modal y mantenimiento predictivo, lo que permite ofrecer soluciones técnicas avanzadas y de alta precisión.
- Adaptabilidad y respuesta rápida: La capacidad de SIGA S.A.S. para adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del mercado y responder con soluciones efectivas le proporciona una ventaja competitiva.

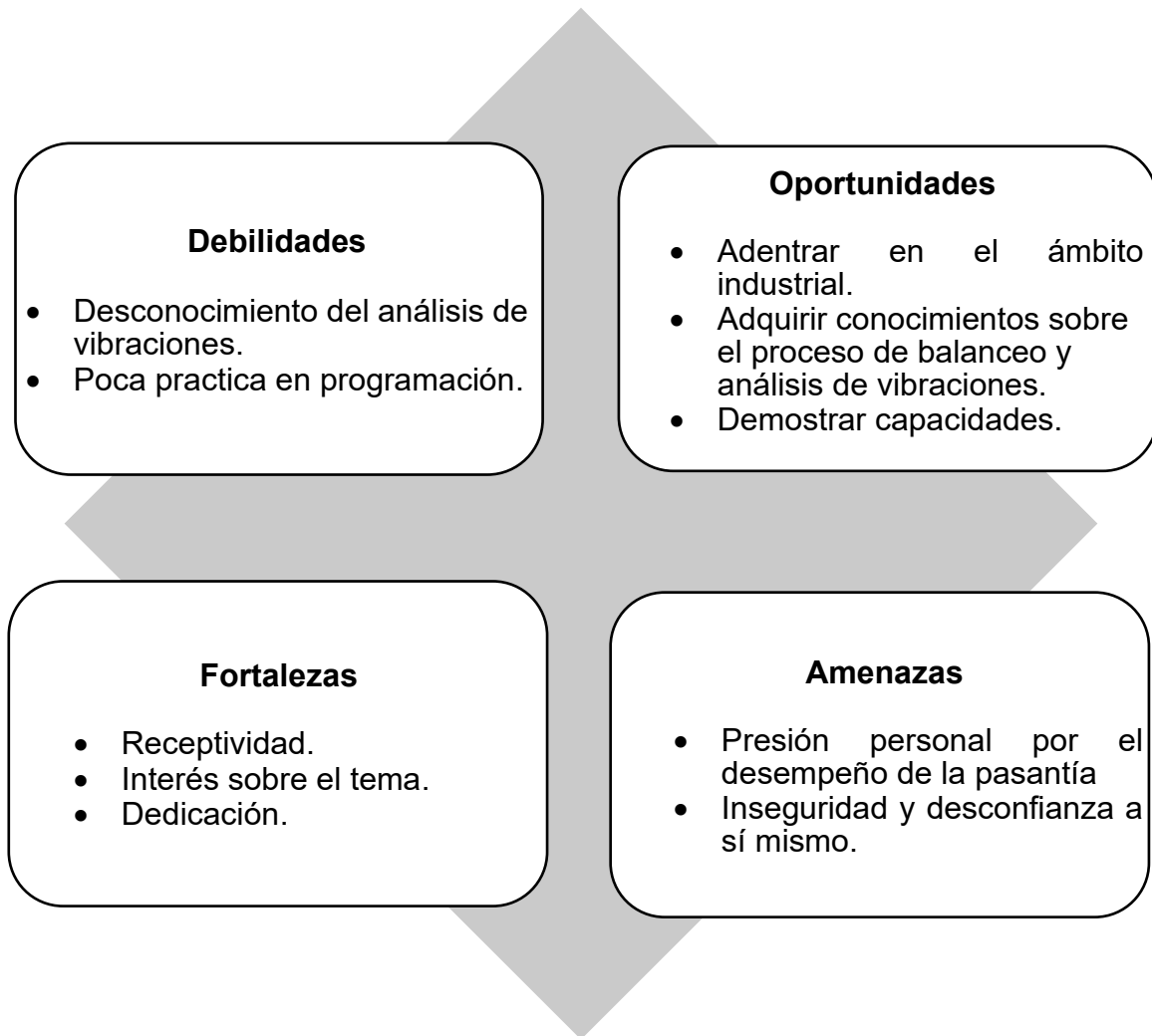
- Infraestructura tecnológica de alto nivel: La empresa cuenta con software y equipos avanzados para análisis modal y vibracional, lo que permite realizar diagnósticos detallados y personalizados para cada cliente.

7.1.4. Amenazas

- Incremento en la competencia: La aparición de nuevos actores en el mercado y la oferta de servicios similares podría ejercer presión sobre los precios y la retención de clientes.
- Cambios económicos y políticos: Las fluctuaciones en el mercado y las modificaciones en las políticas gubernamentales podrían afectar las inversiones y proyectos industriales, reduciendo la demanda de servicios especializados.
- Evolución tecnológica rápida: La velocidad con la que avanzan las tecnologías de análisis y mantenimiento puede hacer que los equipos y procesos actuales queden obsoletos rápidamente si no se mantiene una inversión constante en innovación.

7.2. ANÁLISIS PERSONAL

Se realiza una autoevaluación a través del análisis DOFA personal, en el cual se permite conocer los aspectos en la formación académica que generaron algún inconveniente durante el desarrollo de la pasantía, también, se resalta las oportunidades y fortalezas personales en dicho proceso. A continuación, se presenta gráficamente en análisis mencionado y desglose de cada uno de los aspectos.

Figura 7-2. Análisis DOFA Personal.

7.2.1. Debilidades

- Desconocimiento del análisis de vibraciones: Al inicio de la pasantía, la falta de experiencia en el análisis de vibraciones representa un reto, ya que es un tema clave en el desarrollo del proyecto. Esto implica la necesidad de aprendizaje continuo y consulta con expertos.
- Poca práctica en programación: La programación es una habilidad fundamental en el desarrollo del aplicativo, y la falta de experiencia puede ralentizar el proceso. Es necesario reforzar conocimientos y mejorar la lógica de programación para optimizar el desempeño.

7.2.2. Oportunidades

- Adentrarse en el ámbito industrial: La pasantía permite una inmersión en un entorno real de trabajo, proporcionando experiencia valiosa en el sector y facilitando la transición de la vida académica a la profesional.
- Adquirir conocimientos sobre el proceso de balanceo y análisis de vibraciones: La pasantía brinda la oportunidad de aprender directamente sobre técnicas y normativas del balanceo y análisis de vibraciones, fortaleciendo la formación en ingeniería mecánica.
- Demostrar capacidades: Es una oportunidad para aplicar habilidades y conocimientos, destacarse en el entorno laboral y ganar confianza en la toma de decisiones técnicas.

7.2.3. Fortalezas

- Receptividad: La disposición para aprender y adaptarse a nuevas tecnologías y metodologías facilita el proceso de adquisición de conocimientos.
- Interés sobre el tema: Tener afinidad con el área de análisis de vibraciones y balanceo de rotores favorece la motivación y el compromiso con el proyecto.
- Dedicación: La constancia y el esfuerzo invertido en la pasantía garantizan un aprendizaje efectivo y una mayor calidad en el desarrollo del aplicativo.

7.2.4. Amenazas

- Presión personal por el desempeño en la pasantía: El deseo de obtener buenos resultados para posibilitar la contratación directa con la empresa puede generar estrés y afectar la toma de decisiones, dificultando el desempeño óptimo.
- Inseguridad y desconfianza en sí mismo: La falta de experiencia y el temor a cometer errores pueden impactar negativamente la confianza personal, afectando la fluidez del trabajo y la proactividad.

8. APORTES

Durante la pasantía en Siga SAS, se desarrolló un aplicativo para el balanceo de rotores en un plano, un proceso que anteriormente se realizaba de manera manual. Gracias a este desarrollo, se creó un módulo que fue integrado a la plataforma de monitoreo de vibraciones en línea de la empresa, permitiendo a los clientes balancear sus equipos directamente desde esta herramienta. Esta innovación representó un avance significativo para la organización, optimizando sus procesos y fortaleciendo su oferta de servicios.

Los aportes clave del desarrollo incluyen:

- Automatización del proceso de balanceo

El módulo desarrollado eliminó la necesidad de realizar el análisis y la corrección del desbalance de forma manual, incrementando la precisión y reduciendo los tiempos operativos de manera notable.

- Mejora en el servicio de monitoreo en línea

La creación del módulo permitió a Siga SAS optimizar el balanceo de los equipos bajo monitoreo de vibraciones en línea, elevando la eficiencia y calidad del servicio prestado a sus clientes.

- Prolongación de la vida útil de componentes y reducción de mantenimientos correctivos

La implementación del módulo permitió disminuir significativamente los niveles de vibración causados por desbalance, lo que se tradujo en una menor frecuencia de fallas y una reducción en las intervenciones correctivas no programadas. En equipos como ventiladores industriales, se logró aumentar el intervalo de reemplazo de elementos de apoyo de aproximadamente 3.5 a 10 meses, lo que representa una mejora del 65 % en la vida útil de estos componentes. Esto se reflejó en menores costos de mantenimiento y mayor disponibilidad operativa.

- Aumento de la confiabilidad de los resultados

La automatización introducida asegura cálculos rápidos y consistentes, minimizando errores humanos y garantizando una mayor calidad en el balanceo.

- Agilidad en la toma de decisiones

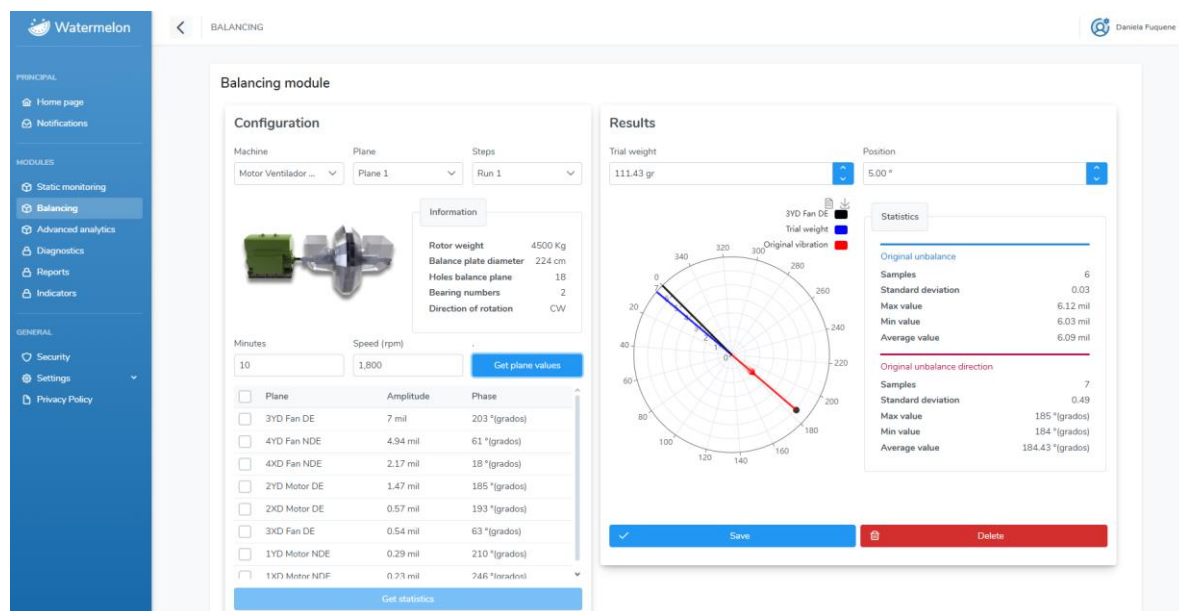
Al integrarse en la plataforma digital de la empresa, el módulo facilita a los usuarios el análisis de datos en tiempo real y la implementación de correcciones de manera inmediata.

➤ Elevación de la experiencia del cliente

Los clientes de Siga SAS se benefician ahora de un servicio más rápido, preciso y confiable, lo que mejora su satisfacción y refuerza la competitividad de la empresa en el sector.

Gracias al desarrollo realizado, se creó un módulo que no solo automatizó un proceso interno, sino que también generó un avance significativo para Siga SAS. Este aporte fortaleció la capacidad de la empresa para ofrecer un servicio de balanceo en un plano de equipos rotativos más confiable y alineado con estándares de innovación tecnológica siempre verificando el proceso con la norma ISO 21940.

Figura 8-1. Implementación del módulo de balanceo en la plataforma de la empresa en base al aplicativo desarrollado.



9. LECCIONES APRENDIDAS

El desarrollo del proyecto permitió la adquisición de nuevas habilidades en programación, especialmente en la creación de aplicaciones con interfaz gráfica. Antes de esta experiencia, la programación de interfaces representaba un desafío desconocido, pero con la práctica se logró fortalecer la capacidad para diseñar y estructurar código de manera eficiente, mejorando así las competencias técnicas en desarrollo de *software*.

Este proceso también evidenció la importancia de superar la inseguridad ante lo desconocido. Enfrentar un reto de esta magnitud implicó salir de la zona de confort y asumir nuevas responsabilidades. A medida que avanzaba el proyecto, quedó demostrado que, con esfuerzo, dedicación y un enfoque progresivo, es posible adquirir nuevas habilidades y superar cualquier barrera de aprendizaje.

Otro aspecto clave aprendido fue la relevancia de la planificación y la gestión del tiempo. Cada etapa del desarrollo requirió una adecuada organización para evitar retrasos y garantizar la calidad del producto final. La estructuración del proceso de balanceo y su implementación en una aplicación exigieron una distribución eficiente del tiempo y los recursos, asegurando que cada funcionalidad cumpliera con los requerimientos establecidos.

Asimismo, la experiencia resaltó la complejidad de transformar un procedimiento manual en un sistema automatizado. En este caso, el análisis matemático desempeñó un papel fundamental, ya que permitió traducir los cálculos teóricos en una solución programable y funcional. Este desafío requirió un profundo entendimiento del método vectorial para el balanceo y su correcta implementación en la aplicación, asegurando la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.

La pasantía no solo permitió la aplicación de conocimientos teóricos en un entorno real, sino que también brindó valiosas lecciones sobre el desarrollo profesional. El proceso de aprendizaje continuo, la confianza en las propias capacidades y la disciplina en la gestión del tiempo se consolidaron como pilares fundamentales para el crecimiento en el ámbito de la ingeniería y el desarrollo de *software*.

10. RECOMENDACIONES

Para garantizar el correcto funcionamiento y aprovechamiento del aplicativo desarrollado, es fundamental velar por su uso adecuado dentro de los alcances para los cuales fue diseñado. La aplicación está específicamente desarrollada para el balanceo en un plano de rotores rígidos, por lo que su aplicación en rotores flexibles podría generar resultados inexactos o ineficaces. Utilizar el *software* en un contexto para el cual no está optimizado podría afectar la confiabilidad del proceso de balanceo y comprometer el desempeño de los equipos.

Además, aunque la aplicación proporciona una asistencia visual que facilita la interpretación de los resultados y la orientación de los pesos de corrección, es crucial que los usuarios cuenten con conocimientos previos sobre la identificación adecuada de los sensores, la orientación de estos y la referencia externa utilizada en el proceso. La precisión de la respuesta del aplicativo depende directamente de estos factores; una mala configuración o interpretación podría inducir respuestas erróneas y generar vibraciones no deseadas, lo que a su vez podría desencadenar otras fallas en los equipos.

Por otro lado, se recomienda mantener un enfoque de mejora continua en el desarrollo del aplicativo. Es importante evaluar periódicamente su desempeño, explorar nuevas alternativas y considerar la implementación de actualizaciones que optimicen su funcionamiento. En particular, se sugiere la expansión del aplicativo mediante el desarrollo de un módulo de balanceo en dos planos, lo que permitiría atender una gama más amplia de equipos y mejorar la eficiencia del servicio de monitoreo de vibraciones. Esta evolución no solo fortalecería la competitividad de la empresa, sino que también respondería de manera más efectiva a las necesidades de los clientes, proporcionando soluciones más avanzadas y tecnológicas para el mantenimiento.

Finalmente, promover la capacitación de los técnicos en el uso del aplicativo y en la interpretación de los resultados contribuirá a minimizar errores operativos y garantizar un mejor aprovechamiento de la herramienta. Implementar sesiones de formación y actualización periódicas permitirá que el personal esté siempre al tanto de las mejoras y nuevas funcionalidades que se integren al sistema.

11. CONCLUSIONES

El desarrollo de la aplicación de escritorio en *Visual Basic .NET* mediante la plataforma *Visual Studio* permitió reemplazar los métodos manuales y empíricos utilizados en el balanceo de rotores rígidos en un plano. Con esta implementación, la empresa SIGA S.A.S. ha optimizado sus procesos de mantenimiento predictivo, incrementando la precisión en la corrección de desbalances.

La interfaz de usuario fue diseñada para ser intuitiva y de fácil interpretación, facilitando el proceso de balanceo para los operarios. Gracias a esto, la empresa puede ejecutar el balanceo con mayor confianza y precisión, reduciendo la probabilidad de errores humanos y mejorando la experiencia de uso.

En el *backend* de la aplicación se integró el método de análisis vectorial para el balanceo en un plano de rotores rígidos. La aplicación realiza cálculos precisos y confiables, asegurando que los pesos de corrección sean determinados de manera rápida y correcta, lo que contribuye a optimizar el rendimiento del equipo intervenido. Adicional, en el desarrollo del software no solo tuvo en cuenta la perspectiva del programador si no también los requerimientos sugeridos por usuarios potenciales del aplicativo, de este modo se garantiza que la herramienta no solo cumpla con los estándares técnicos, sino que también responda de manera efectiva a la mayoría de las necesidades reales de quienes la utilizarán, mejorando su usabilidad, funcionalidad y aceptación en el entorno operativo.

Para garantizar la calidad del aplicativo, se realizaron pruebas en condiciones reales de operación como lo son el *rotorkit* y ventiladores. Estas pruebas verificaron su correcto funcionamiento y aseguraron que los resultados cumplieran con los estándares de la norma ISO 21940. Se confirmó así la efectividad del aplicativo en la optimización del balanceo de rotores, validando su utilidad dentro del entorno industrial.

Además, se elaboró un manual de usuario detallado que explica el correcto uso de la aplicación, proporcionando instrucciones claras sobre su funcionalidad, los parámetros de entrada y salida, y las mejores prácticas para su uso en el proceso de balanceo.

La implementación de la aplicación permitió que SIGA S.A.S. integre el balanceo de rotores dentro de su plataforma de monitoreo en línea, mejorando significativamente su servicio de análisis de vibraciones. Esto ha optimizado el mantenimiento predictivo de los equipos y ha facilitado una mejor gestión de los procesos de balanceo, reduciendo tiempos de intervención y costos, asimismo aumentando la confiabilidad de los equipos monitoreados.

En conclusión, el desarrollo de la aplicación cumplió con los objetivos planteados, proporcionando una solución tecnológica eficiente y precisa para el balanceo de

rotores rígidos en un plano. Su implementación ha representado un avance significativo para la empresa SIGA S.A.S., alineándose con los requerimientos del cliente, estándares de calidad internacionales y fortaleciendo sus capacidades en el mantenimiento predictivo de equipos rotativos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SIGA SAS, *Servicios Integrales en Gestión de Activos. Nosotros*. [En línea]. Disponible en: <https://sigasas.com/index.php/nosotros-siga>
- [2] American Petroleum Institute (API), *670 Machinery Protection Systems*, 6th ed. Washington, D.C.: API Publishing Services, 2022.
- [3] R. Tiwari, *Rotor Systems: Analysis and Identification*. Boca Ratón: CRC Press, 2017.
- [4] International Organization for Standardization, *ISO 20816 Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration- Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min*. Geneva: ISO, 2022.
- [5] International Organization for Standardization, *ISO 13373 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1 General procedures*. Geneva: ISO, 2002.
- [6] J. N. Robbins, *Learning Web Design*, 4th ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2012.
- [7] A. Freeman, *Pro ASP.NET Core MVC*, 6th ed. New York: Apress, 2016.
- [8] T. Dresher, A. Zuker, and S. Friedman, *Hands-On Full-Stack Web Development with ASP.NET Core*. Birmingham: Packt Publishing, 2018.
- [9] International Organization for Standardization, *ISO 20816 Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines*. Geneva: ISO, 2022.
- [10] International Organization for Standardization, *ISO 21940 Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 1: Introduction*. Geneva: ISO, 2019.
- [11] S. S. Rao, *Vibraciones mecánicas*, 5th ed. México: Pearson Educación, 2012.
- [12] L. Ercoli and S. La Malfa, *Teoría y práctica de balanceo de rotores industriales*. Buenos Aires: Buenos Aires, 2002.
- [13] D. O. Bukowitz, *Desbalance del Ventilador de un Intercambiador de Calor*, 2010.
- [14] D. E. Bently, *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, B. Grissom, Ed. Minden: Bently Pressurized Bearing Company, 2002.

- [15] VIVA INDUSTRIAL, *Bently Nevada: Innovación en Monitoreo de Condición y Protección de Maquinaria*. J. Vilcherrez, 2025.
- [16] E. W. Swokowski and J. A. Cole, *Álgebra y trigonometría con geometría analítica*. México: Cengage Learning, 2011.
- [17] International Organization for Standardization, *ISO 21940 Mechanical vibration — Rotor balancing— Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour*. Geneva: ISO, 2016.
- [18] A. D. Santos Galán, *Análisis comparativo de los IDE's de desarrollo Xamarin Visual Studio vs Android Studio aplicado al sistema de notificación de actividades de la UNACH*. Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2017.
- [19] Microsoft, *Introducción al IDE de Visual Studio* [En línea]. Disponible en: <https://learn.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2022>
- [20] D. Ó Tuama, *A Guide to Visual Studio: How to Use* [En línea]. 2023. Disponible en: <https://codeinstitute.net/global/blog/a-guide-to-visual-studio-how-to-use>
- [21] L. M. Blanco, *Programación en Visual Basic .NET*. Madrid: Grupo EIDOS, 2002.

ANEXOS

ANEXO A

Manual de usuario.

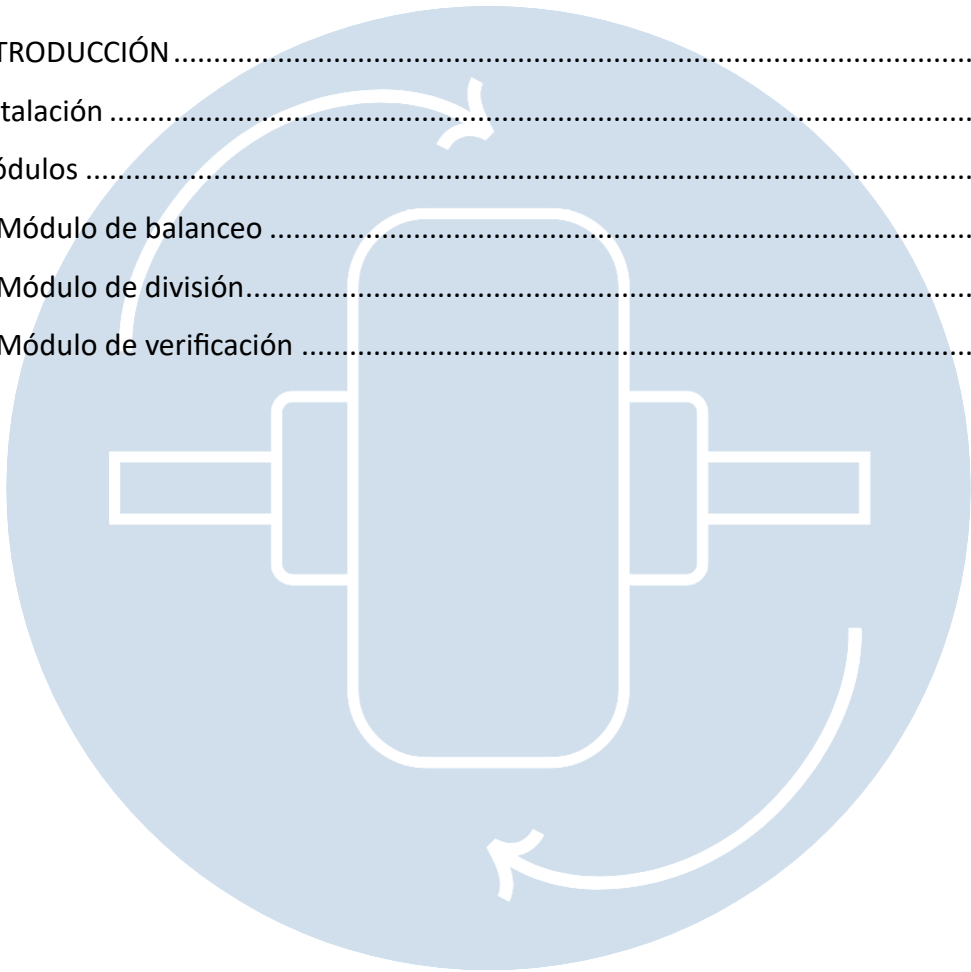
ANEXO A

MANUAL DE USUARIO

MANUAL DEL USUARIO APLICACIÓN DE BALANCEO EN UN PLANO

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	140
2.	Instalación	140
3.	Módulos	142
3.1.	Módulo de balanceo	142
3.2.	Módulo de división.....	153
3.3.	Módulo de verificación	155



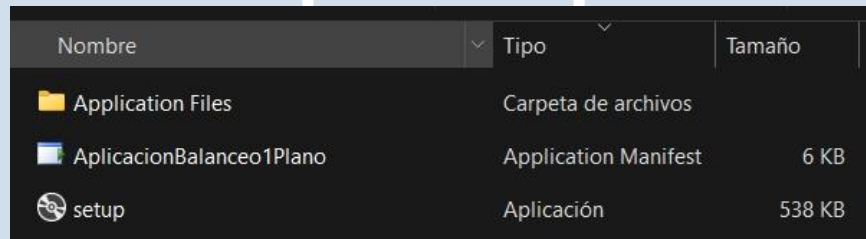
1. INTRODUCCIÓN

Este aplicativo de escritorio ha sido desarrollado con el propósito de *asistir* el proceso de balanceo de rotores *rígidos en un solo plano*, utilizando el método de pesos de calibración. Su principal función es guiar al usuario a lo largo del procedimiento, proporcionando resultados clave como el peso de calibración, el peso de corrección y la ubicación angular correspondiente para su instalación. Todas las respuestas generadas por la aplicación se basan en los datos ingresados por el usuario.

2. Instalación

Al usuario se le proporciona una carpeta en la cual cuenta con 3 archivos, la carpeta de archivos y el *Application Manifest* son necesarios internamente para la instalación del programa, sin embargo, el único archivo que se abre es el *Setup* esta es la aplicación compilada.

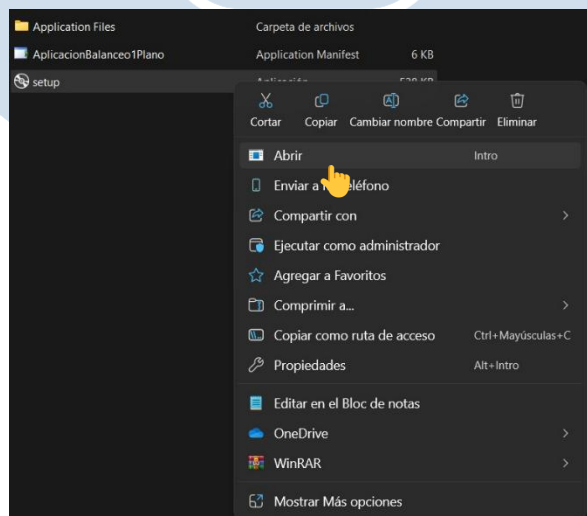
Figura 2.1. Archivos carpeta inicial.



Nombre	Tipo	Tamaño
Application Files	Carpeta de archivos	
AplicacionBalanceo1Plano	Application Manifest	6 KB
setup	Aplicación	538 KB

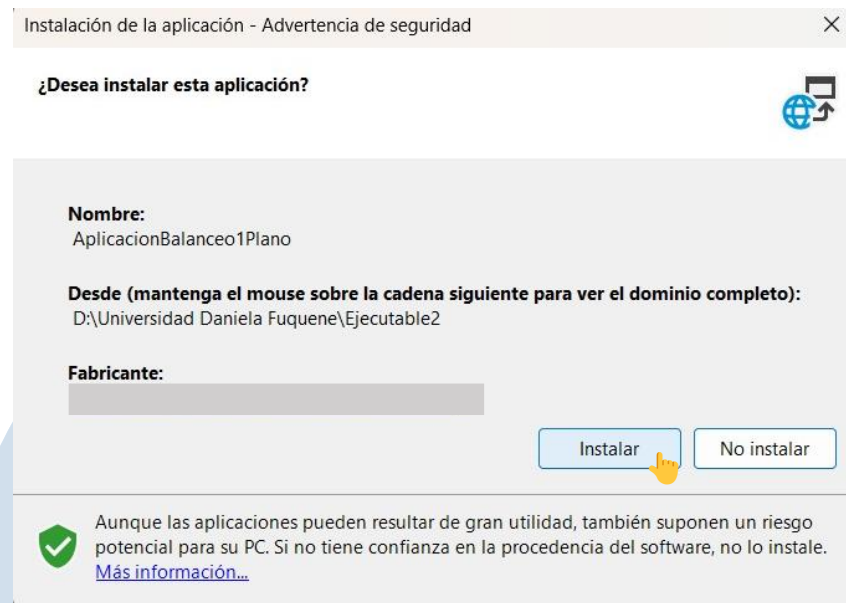
Para instalar el aplicativo, se da clic derecho sobre el archivo Setup y clic en “Abrir”.

Figura 2.2. Abrir setup.



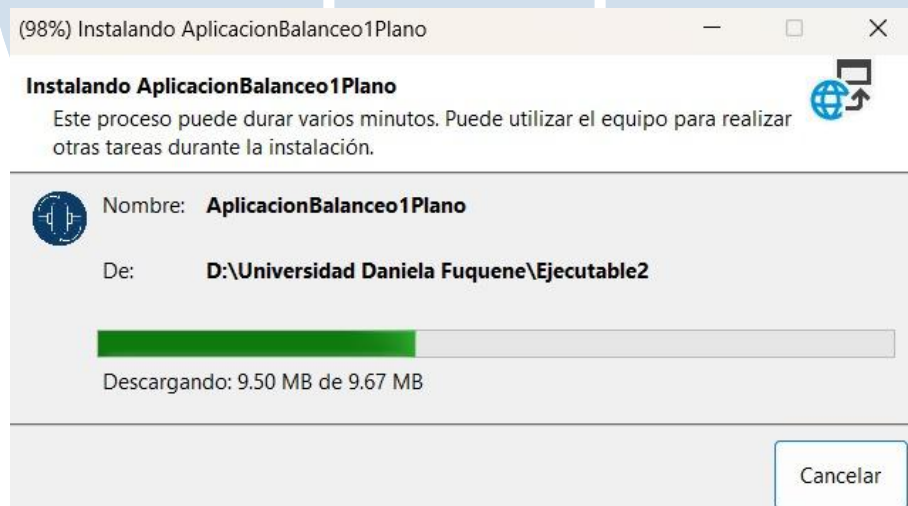
Después de esto, se mostrará una ventana emergente la cual pregunta si se desea instalar la aplicación, va a dar clic en “Instalar”.

Figura 2.3. Ventana instalación.



Se mostrará el progreso de la instalación de la aplicación en la ventana emergente.

Figura 2.4. Ventana progreso instalación.

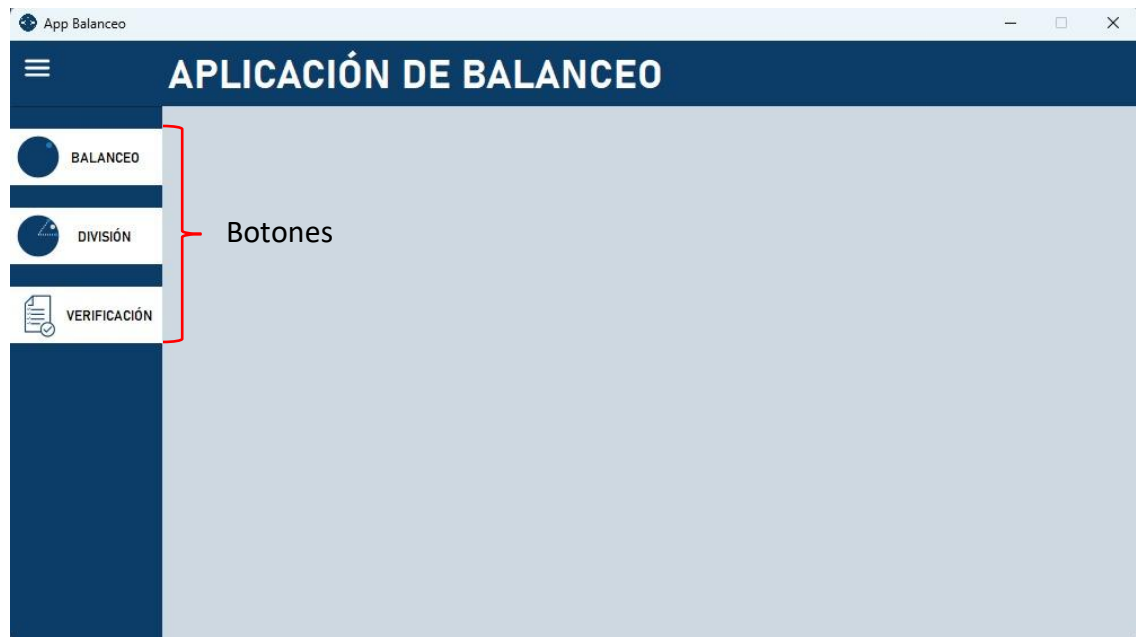


Una vez completada al 100% la instalación, se abrirá automáticamente el aplicativo en la interfaz inicial.

3. Módulos

La aplicación se divide en 3 módulos correspondientes a: módulo de balanceo, módulo de división de peso y módulo de verificación, los cuales pueden ser navegables por los botones ubicados en el costado izquierdo de la interfaz principal.

Figura 3.1. Interfaz principal.



Nota: Al cambiar de un módulo a otro los procesos se reinician.

3.1. Módulo de balanceo

Se accede al módulo de balanceo presionando el botón “Balanceo” en la interfaz principal (Ver **Figura 3.1.1**) luego, se presiona el botón “Iniciar proceso de balanceo” (Ver **Figura 3.1.2**). En este módulo se guía el proceso de balanceo, este proceso se divide en 4 partes descritas a continuación.

Figura 3.1.1. Ingreso a módulo de balanceo

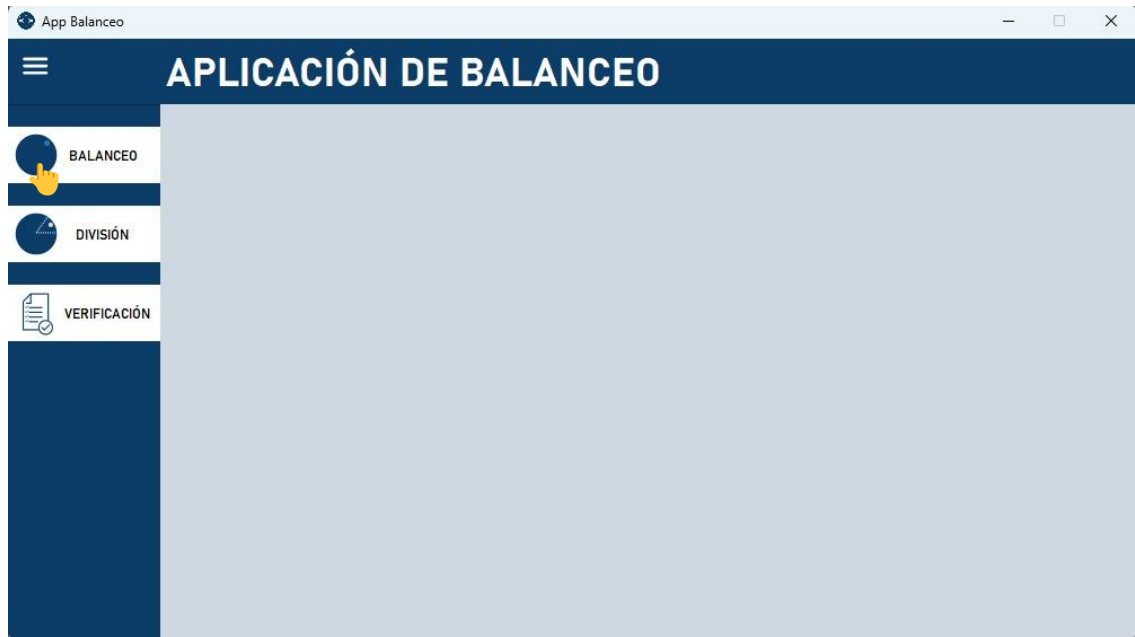
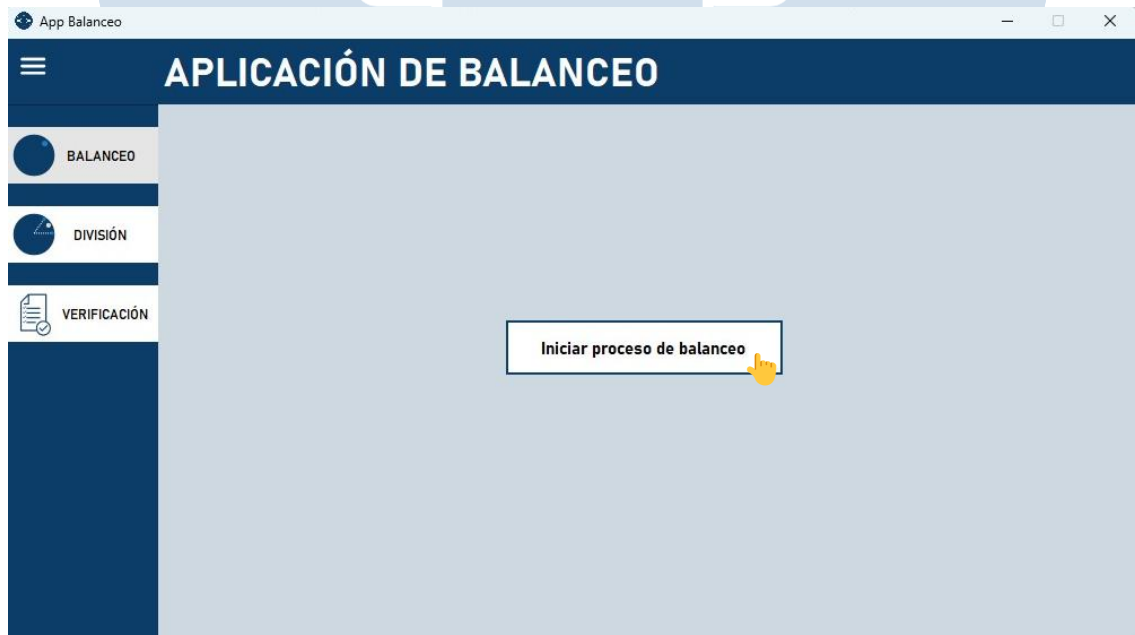


Figura 3.1.2. Inicio del proceso

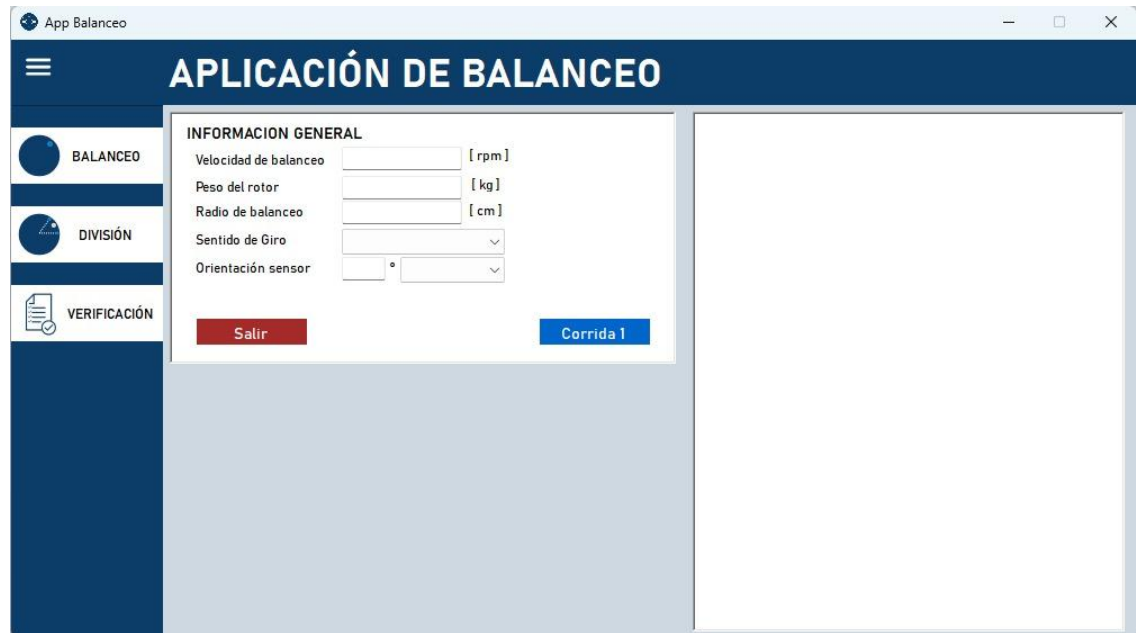


Después de dar inicio al proceso, se muestra la interfaz de la primera parte del proceso de balanceo (ver **Figura 3.1.3**), esta parte consta del ingreso de las variables generales del proceso, las cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3.1.1. Definición de variables generales - Módulo de balanceo

Variable	Definición	Unidad
Velocidad de balanceo	Es la velocidad angular en la cual se ejecutará el proceso de balanceo, e indica la cantidad de rotaciones por minuto que completa el rotor.	Revoluciones por minuto (rpm)
Peso del rotor	Corresponde al peso en unidad de masa del rotor.	Kilogramos (kg)
Radio de balanceo	Es el radio disponible del rotor en el cual se instalarán los pesos de calibración y/o corrección, este radio no debe cambiar en el proceso.	Centímetros (cm)
Sentido de giro	Es el sentido de giro del rotor, se puede definir como horario o antihorario, visto preferiblemente desde el equipo conductor al conducido.	n/a
Orientación del sensor	Es la ubicación en grados del sensor seleccionado para el proceso de balanceo y orientación de dichos grados desde el 0 vertical positivo.	Grados (°)

Figura 3.1.3. Ingreso información general- Módulo balanceo



The screenshot displays the 'App Balanceo' window. The title bar shows 'App Balanceo' and standard window controls. The main header is 'APLICACIÓN DE BALANCEO'. A left sidebar contains three menu items: 'BALANCEO' (selected), 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN'. The 'INFORMACION GENERAL' form includes the following fields: 'Velocidad de balanceo' (text input with '[rpm]' unit), 'Peso del rotor' (text input with '[kg]' unit), 'Radio de balanceo' (text input with '[cm]' unit), 'Sentido de Giro' (dropdown menu), and 'Orientación sensor' (text input with a degree symbol and a dropdown menu). At the bottom of the form are two buttons: 'Salir' (red) and 'Corrida 1' (blue). A large, light blue circular graphic with a white arrow is overlaid on the bottom half of the image, pointing from the 'Corrida 1' button towards the text below.

Una vez ingresadas las variables se puede seguir a la parte 2 presionando el botón **“corrida 1”**, Se debe tener en cuenta que si no se ingresan completamente las variables el aplicativo no deja continuar el proceso y mostrará un mensaje del error, del mismo modo si se ingresan caracteres no numéricos y diferentes a punto “.”. Para cerrar este mensaje de debe presionar el botón “aceptar” y se procede a ingresar las variables correctamente.

Figura 3.1.4. Error espacio en blanco.

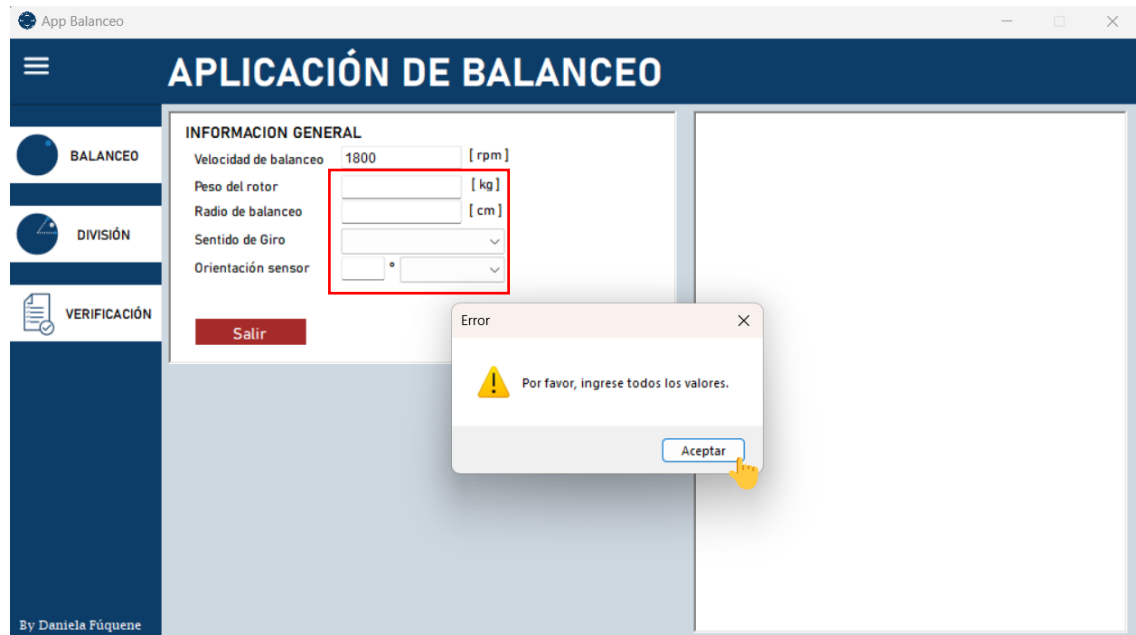
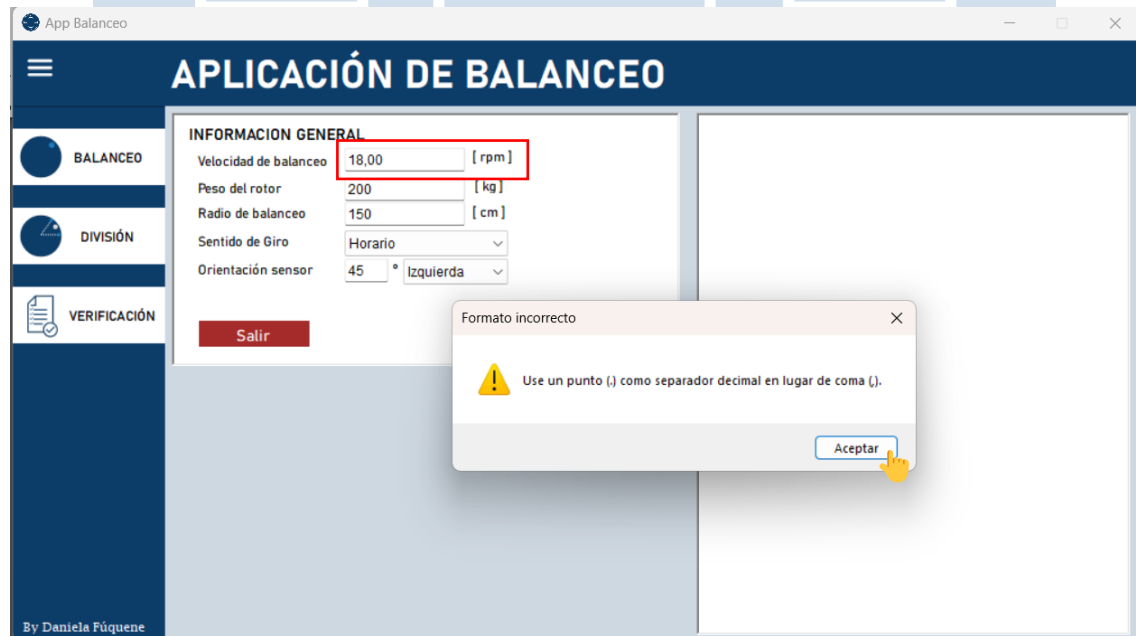


Figura 3.1.5. Formato incorrecto de ingreso.

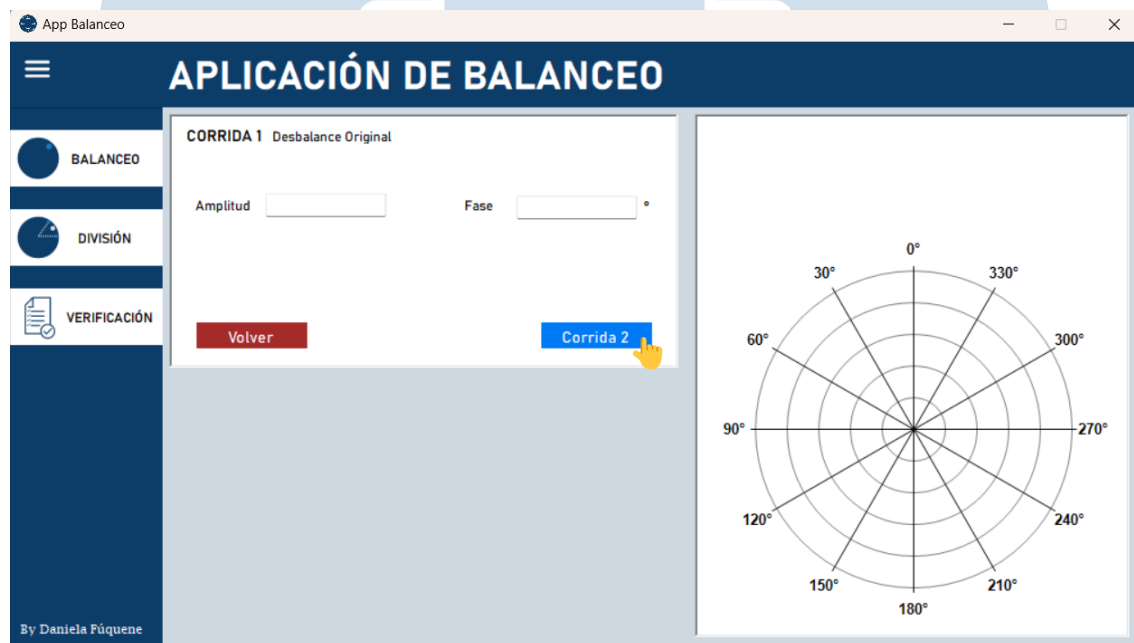


En la segunda parte se ingresan los valores de amplitud y fase del sensor seleccionado para el balanceo correspondiente a la primera corrida, la cual define el desbalance original del rotor.

La amplitud en esta parte corresponde a el valor de la vibración de la frecuencia fundamental 1X en la primera puesta en marcha del equipo, sin agregar ningún peso de calibración, ya que se busca hallar el desbalance original del rotor como se menciona anteriormente. Por otro lado, no se especifican las unidades, ya que se hace la suposición que en las demás corridas se va a manejar la misma unidad de vibración, bien sea mil, micras, in/s y demás variables seleccionadas de acuerdo con el criterio del usuario en el analizador de vibraciones.

La fase, hace a la posición relativa con respecto a la referencia del *keyphasor* en el mismo instante de tiempo, esta se da en unidad de grados.

Figura 3.1.6. Corrida 2 Desbalance original- Módulo de balanceo.



En el costado derecho se grafica el diagrama polar de acuerdo con los datos ingresados en la parte 1 “Información general”, en este diagrama se dibujan los vectores de vibración a medida del proceso. Una vez ingresados los datos de amplitud y fase de la primera corrida,

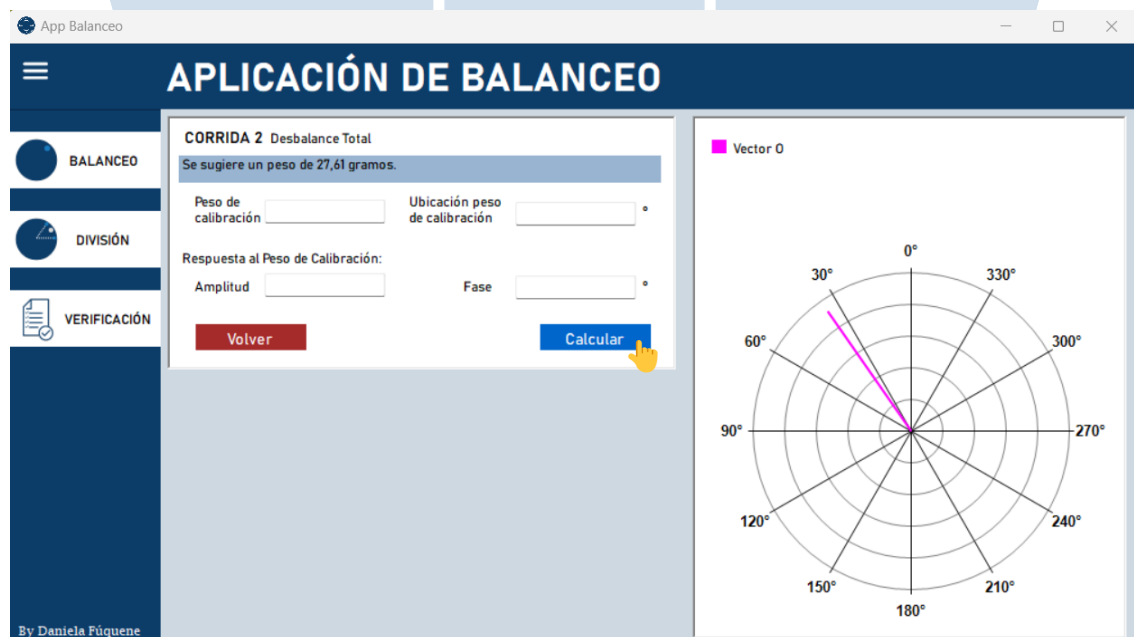
se presiona el botón “Corrida 2” para continuar con la siguiente parte del proceso. En caso de querer corregir algún valor de la sección anterior se presiona el botón “Volver”.

Después de presionar el botón “Corrida 2” se habilita el panel correspondiente a la tercera parte del proceso, la cual se basa en la instalación del peso de calibración y su respuesta en la puesta en marcha del equipo. Para ello se solicitan las variables de peso de calibración en gramos y la ubicación de este en grados, basado en el diagrama polar dibujado de acuerdo con la referencia inicial. La aplicación sugiere un peso de calibración, esto calculado con los datos ingresados en la parte 1, sin embargo, este peso puede variar dependiendo de la respuesta del equipo y/o experiencia del usuario con el equipo, por tal razón se solicita el valor final del peso de calibración instalado, ya que es fundamental para la correcta respuesta del proceso de balanceo.

En este mismo panel, se ingresa el valor de la amplitud de la frecuencia fundamental 1X correspondiente a la segunda puesta en marcha (en la cual se obtiene el desbalance total), teniendo en cuenta que debe tener la misma unidad de vibración con el valor ingresado en la corrida anterior; del mismo modo, se ingresa la fase obtenida por el analizador de señales de vibración.

Una vez ingresados todos los valores, se presiona el botón “Calcular”, el cual es el encargado de habilitar el panel de resultados.

Figura 3.1.7. Corrida 2 Desbalance total- Módulo de balanceo



Por último, en la cuarta parte se muestra el panel de resultados, en la cual se sugiere un peso de corrección en gramos y ubicación en grados de este basado en la información ingresada en los anteriores pasos, del mismo como, en el gráfico polar ubicado en el costado derecho de la interfaz se grafican los vectores ingresados y la ubicación del peso de corrección. También se grafica el vector opuesto al original y el vector C (respuesta debida exclusivamente al peso de calibración instalado) con el fin de guiar y dar seguridad al usuario si desea verificar los resultados. De este modo se da como finalizado la guía del proceso de balanceo, por otro lado, al igual que en los anteriores paneles se puede retornar al panel anterior de ser necesario.

Una vez dado por terminado el proceso se presiona el botón “Finalizar” en el cual se le preguntará si desea guardar lo datos, si la respuesta es afirmativa se exportan los datos en .csv y se crea un informe .pdf con los datos utilizados y la respuesta, este documento se guardará automáticamente en el escritorio, con la fecha y hora de guardado y luego limpiará los datos. Por el contrario, si la respuesta es negativa el programa se encargará de limpiar los datos y dirigir a la interfaz principal.

Figura 3.1.8. Resultados- Módulo de balanceo

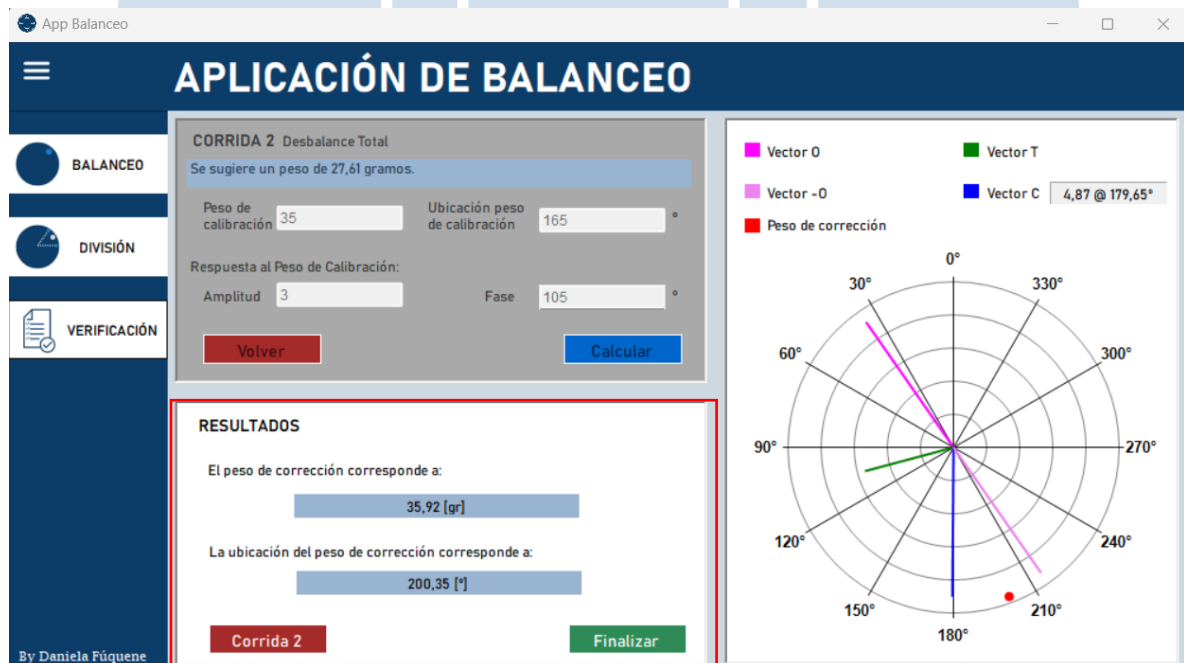


Figura 3.1.9. Exportación de datos- Módulo de balanceo.

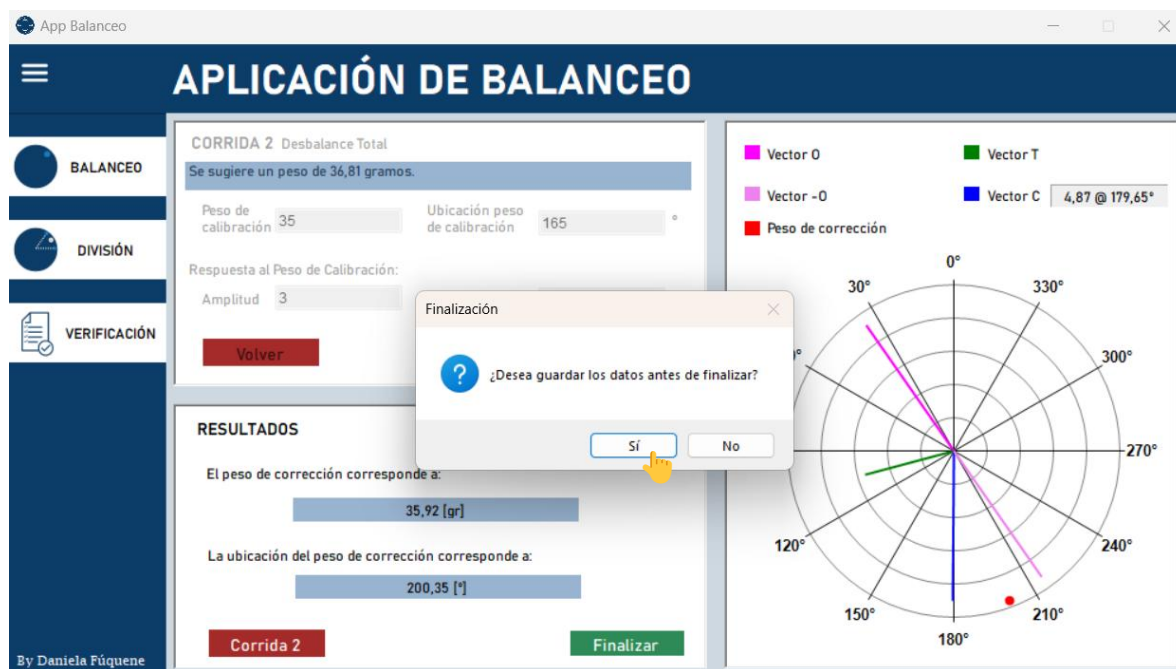


Figura 3.1.10. Nombre de archivos de datos guardados- Módulo de balanceo

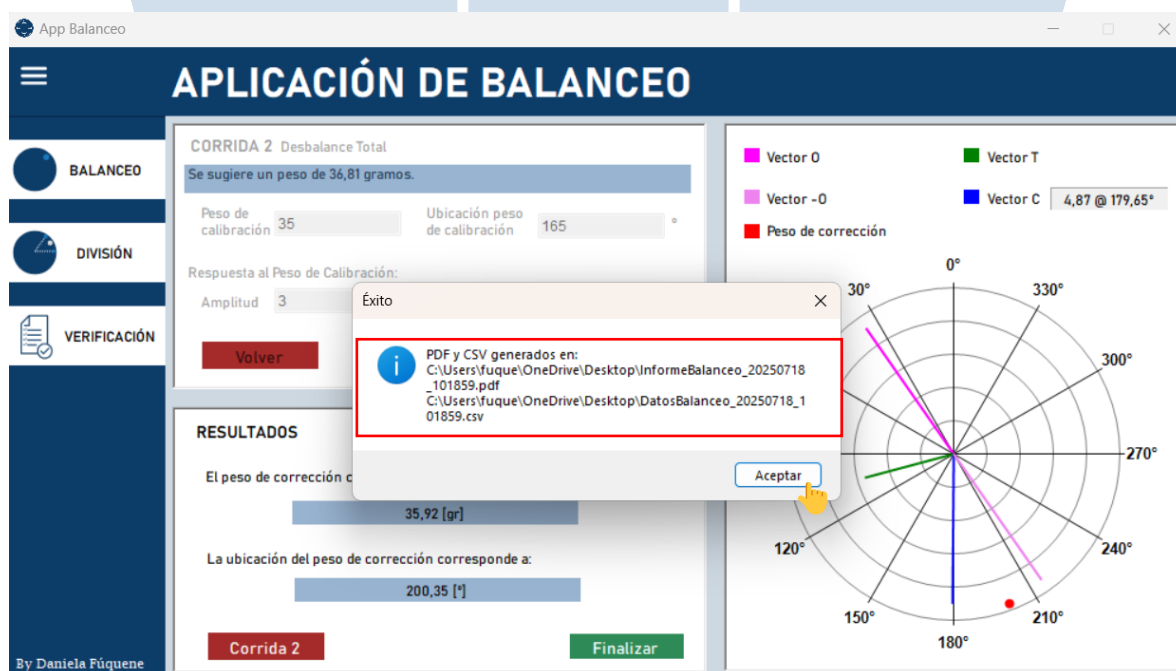


Figura 3.1.11. Informe de balanceo generado.

INFORME BALANCEO

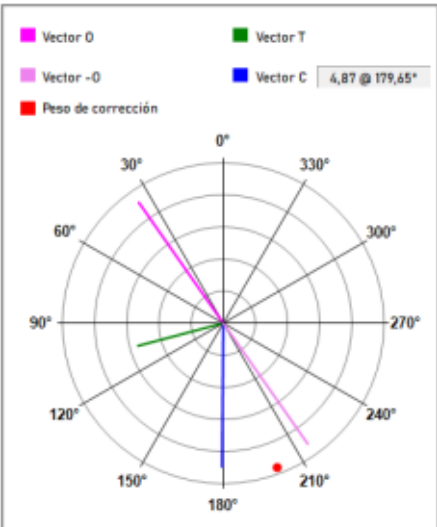
A continuación se presentan los datos utilizados y de respuesta en el proceso de balanceo realizado el 18 - 07 - 2025 sobre las 10 : 19.

Información general

Parámetro	Valor
Velocidad de Balanceo	1800.00 rpm
Peso del rotor	3000.00 kg
Radio de balanceo	225.00 cm
Sentido de giro	Horario
Orientación sensor (plano)	360.00° hacia Derecha

Vectores

Vector / Peso	Amplitud / Peso	Fase / Ubicación
Vector original de desbalance	5.00	35.00°
Peso de calibración	35.00 g	165.00°
Vector total (respuesta)	3.00	105.00°
Vector resultante C	4.87	179.65°
Peso de corrección sugerido	35.92 g	200.35°



La exportación de los datos en .csv se puede abrir en *Excel*, puede que al abrirlas se tengan las variables y valores en una misma celda y sea difícil su comprensión, para organizar estos datos se debe utilizar la función de *Excel* "Texto en columnas", esta identifica la función de tabulaciones programadas en el *software* para la exportación y organizará los valores en la celda correspondiente.

Figura 3.1.12. Visualización de datos exportados inicialmente.

	A	B	C	D
1	Parámetro	Valor	Unidad	
2	Velocidad de Balanceo	1800	rpm	
3	Peso del Rotor	3000	kg	
4	Radio de Balanceo	225	cm	
5	Sentido de Giro	Horario		
6	Orientación sensor	360	hacia Derecha	
7	Vector Original Amplitud	5		
8	Vector Original Fase	35°		
9	Peso de Calibración	35	g	
10	Fase Peso de Calibración	165°		
11	Vector Total Amplitud	3		
12	Vector Total Fase	105°		
13	Vector Resultante Amplitud	4,87230907273235		
14	Vector Resultante Fase	179,648444900767°		
15	Peso de Corrección	35,9172616900228	g	
16	Fase de Corrección	200,351555099233°		

Figura 3.1.13. Visualización de datos organizados con función "Texto en columna".

	A	B	C
1	Parámetro	Valor	Unidad
2	Velocidad de Balanceo	1800	rpm
3	Peso del Rotor	3000	kg
4	Radio de Balanceo	225	cm
5	Sentido de Giro	Horario	
6	Orientación sensor	360	hacia Derecha
7	Vector Original Amplitud	5	
8	Vector Original Fase	35 °	
9	Peso de Calibración	35	g
10	Fase Peso de Calibración	165 °	
11	Vector Total Amplitud	3	
12	Vector Total Fase	105 °	
13	Vector Resultante Amplitud	4,872309073	
14	Vector Resultante Fase	179,6484449 °	
15	Peso de Corrección	35,91726169	g
16	Fase de Corrección	200,3515551	°

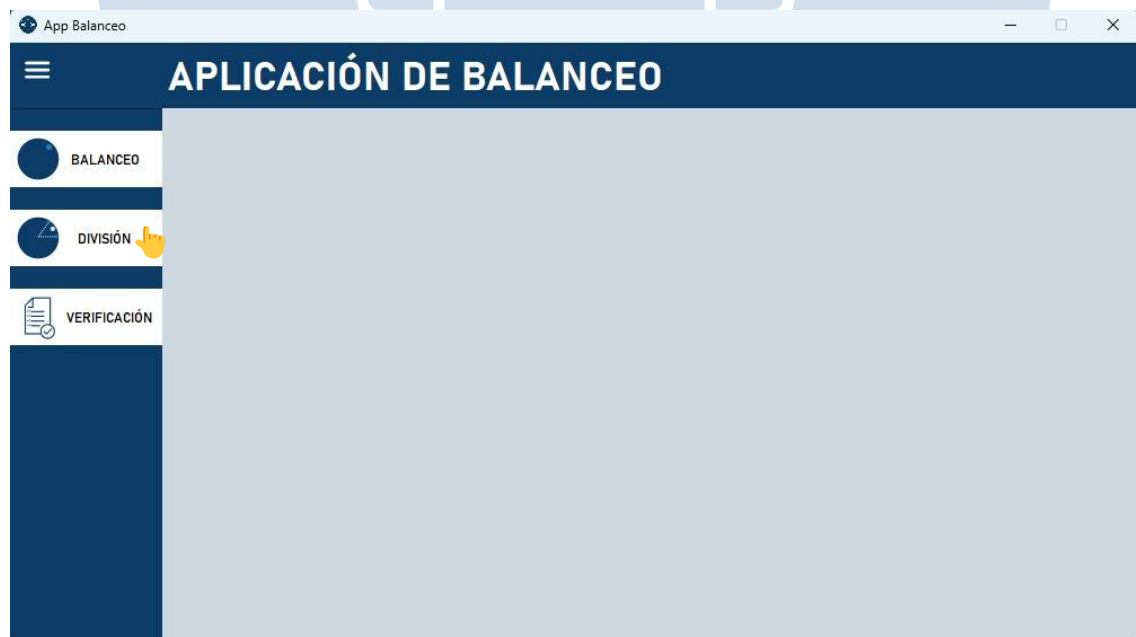
3.2. Módulo de división

Este módulo es el encargado de generar la división o Split del peso de corrección o del peso prueba en determinadas ubicaciones, esto se realiza cuando no es posible ubicar el peso en la posición calculada por diversas razones, como por ejemplo no contar con el agujero en esa dirección o tener el agujero ocupado. En este módulo se busca generar la misma respuesta con dos pesos en diferentes posiciones.

Para ello, se deben conocer las posiciones finales o disponibles, el peso a dividir inicial y la dirección o ubicación inicial u original. La unidad de las direcciones se maneja en grados, en cambio la unidad del peso se deja a disposición del usuario, ya que la respuesta de los dos pesos divididos se da en la misma unidad de entrada.

Para ingresar al módulo de división se presiona el botón “División”, después de esto se muestra el panel de ingreso de datos. En el cual se ingresan los valores correspondientes a las variables mencionadas anteriormente; al igual en el módulo de balanceo se permiten solo caracteres numéricos y el separador decimal como “.”, del mismo modo no acepta espacios en blanco.

Figura 3.2.1. Selección módulo de división.

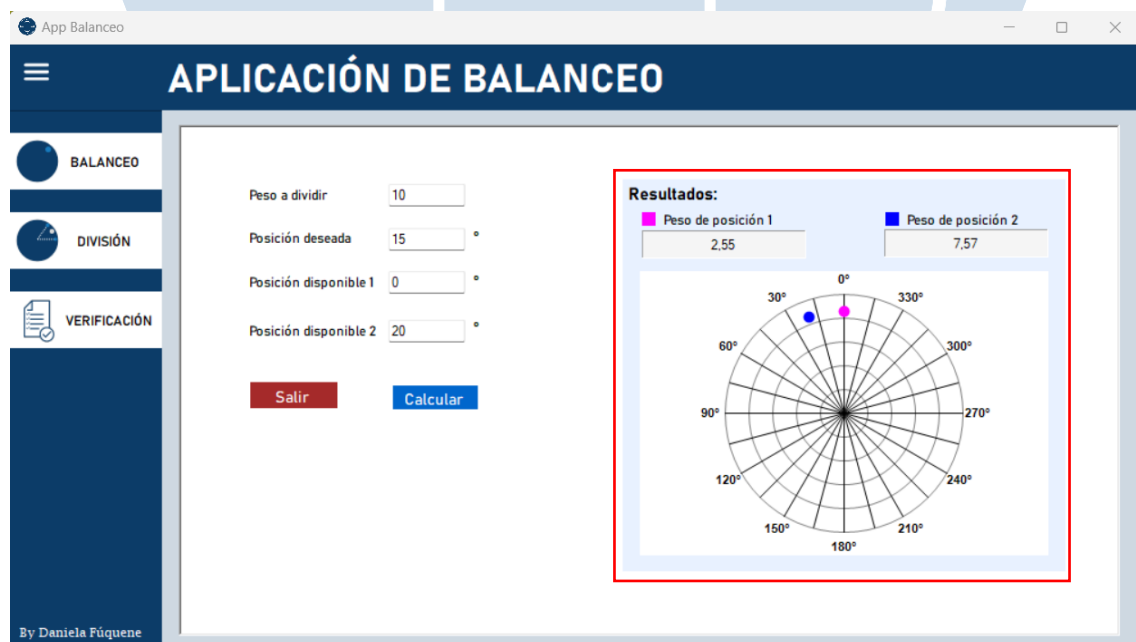


Una vez ingresados los datos se presiona el botón “Calcular” el cual mostrará el panel de resultados (ver **Figura 3.2.3. Resultados - Módulo de división**), es importante que la posición deseada ingresada se encuentre entre los valores de la posición disponible 1 y 2, con el fin de dar coherencia con el proceso de división.

Figura 3.2.2. Ingreso de valores - Módulo división.

The screenshot shows a web application titled "APLICACIÓN DE BALANCEO". On the left is a sidebar with three menu items: "BALANCEO" (selected), "DIVISIÓN", and "VERIFICACIÓN". The main content area contains a form with the following fields: "Peso a dividir" with the value 10, "Posición deseada" with the value 15, "Posición disponible 1" with the value 0, and "Posición disponible 2" with the value 20. Below the fields are two buttons: "Salir" (red) and "Calcular" (blue). A yellow hand cursor is pointing at the "Calcular" button. At the bottom left of the sidebar, it says "By Daniela Fúquene".

Figura 3.2.3. Resultados - Módulo de división.



En este panel se muestra el peso necesario tanto en la posición 1 como en la posición 2, y estos pesos tienen la misma unidad del peso digitado en “peso a dividir”. También muestra un diagrama polar con una única referencia: el 0 vertical positivo y los grados aumentando en sentido antihorario; este diagrama se grafica con el fin de brindar ayuda visual a el usuario de la ubicación de los pesos.

Si se desea calcular otro peso o en otras direcciones se puede modificar los valores y se vuelve a presionar el botón “Calcular”, si por el contrario se desea salir del proceso de presiona el botón “Salir” este botón preguntará si desea guardar los datos, si es afirmativo se genera el informe y exportación de datos como se mencionó anteriormente en el módulo de balanceo, si por el contrario se desea salir sin guardar los datos se selecciona el botón “NO” y se es dirigido a la interfaz principal.

3.3. Módulo de verificación

El módulo de verificación es el encargado de validar el desbalance residual del equipo después de un proceso de balanceo, basado en la norma ISO 21940-11. Para ello se solicitan las variables definidas en la siguiente tabla:

Tabla 3.3.1. Variables de ingreso - Módulo de verificación.

Variable	Definición	Unidad
Velocidad de balanceo	Es la velocidad angular en la cual se ejecutará el proceso de balanceo, e indica la cantidad de rotaciones por minuto que completa el rotor.	Revoluciones por minuto (rpm)
Peso del rotor	Corresponde al peso en unidad de masa del rotor.	Kilogramos (kg)
Radio de balanceo	Es el radio disponible del rotor en el cual se instalarán los pesos de calibración y/o corrección, este radio no debe cambiar en el proceso.	Centímetros (cm)
Grado de calidad	El grado de calidad según el tipo de equipo, basado en la norma ISO 21940-11.	n/a
Peso prueba instalado	Peso prueba o de calibración instalado para la segunda puesta en marcha del proceso de balanceo.	Gramos (g)

Amplitud vector total	Amplitud de vibración de la frecuencia fundamental 1X en la segunda corrida, correspondiente a la respuesta del rotor con el peso de calibración instalado.	Vibración (mil, micra, in/s, g's)
Amplitud vector final	Amplitud de vibración de la frecuencia fundamental 1X en la última corrida correspondiente a la respuesta del rotor con el peso de corrección instalado.	Vibración (mil, micra, in/s, g's)

Las amplitudes de los vectores deben estar dadas en las mismas unidades de vibración, esto a criterio del usuario.

Figura 3.3.1. Ingreso de variables - Módulo de verificación.

Una vez ingresados los datos correctamente y teniendo en cuenta las restricciones de caracteres mencionadas anteriormente, se presiona el botón “Verificar” el cual habilitará el panel de resultados. En este panel se realiza la comparativa del desbalance residual del proceso con respecto al desbalance permisible dado por la norma, y muestra de acuerdo con esta comparación si el proceso de balanceo fue o no eficiente (según la norma) como se muestra en la **Figura 3.3.2** y la **Figura 3.3.3**.

Por otro lado, si se desea realizar un nuevo proceso de verificación se presiona el botón “Limpiar” el cual limpiará las variables ingresadas y habilita el panel de ingreso para realizar

otra verificación o si por el contrario se desea finalizar el proceso se presiona el botón “finalizar” el cual finaliza el proceso y se dirige a la interfaz principal del aplicativo.

Figura 3.3.2. Resultados proceso de balanceo eficiente - Módulo de verificación.

The screenshot shows the 'APLICACIÓN DE BALANCEO' interface. On the left is a sidebar with three menu items: 'BALANCEO', 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN'. The 'VERIFICACIÓN' menu item is highlighted with a checkmark icon. The main area is divided into two columns. The left column contains two sections: 'Información del equipo' and 'Información del proceso'. The right column contains a 'Resultados' section. At the bottom of the left column are two buttons: 'Salir' (red) and 'Verificar' (green, with a yellow cursor icon). At the bottom of the right column are two buttons: 'Limpiar' (red) and 'Finalizar' (blue).

Información del equipo	
Velocidad de balanceo	1800 [rpm]
Radio de balanceo	20 [cm]
Peso del rotor	2000 [kg]
Grado de calidad	G 6.3

Información del proceso	
Peso prueba instalado	300 [g]
Amplitud vector Total	5
Amplitud vector Final	2

Resultados	
Desbalance residual	Desbalance permisible
24000 g mm	66845,08 g mm
El proceso de balanceo fue eficiente, el desbalance residual no supera el desbalance permisible	

Figura 3.3.3. Resultados proceso de balanceo no eficiente - Módulo de verificación.

The screenshot shows the 'APLICACIÓN DE BALANCEO' interface. On the left is a sidebar with three menu items: 'BALANCEO', 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN'. The 'VERIFICACIÓN' menu item is highlighted with a checkmark icon. The main area is divided into two columns. The left column contains two sections: 'Información del equipo' and 'Información del proceso'. The right column contains a 'Resultados' section. At the bottom of the left column are two buttons: 'Salir' (red) and 'Verificar' (green). At the bottom of the right column are two buttons: 'Limpiar' (red) and 'Finalizar' (blue).

Información del equipo	
Velocidad de balanceo	1800 [rpm]
Radio de balanceo	20 [cm]
Peso del rotor	200 [kg]
Grado de calidad	G 6.3

Información del proceso	
Peso prueba instalado	200 [g]
Amplitud vector Total	5
Amplitud vector Final	2

Resultados	
Desbalance residual	Desbalance permisible
16000 g mm	6684,51 g mm
El proceso de balanceo NO fue eficiente, el desbalance residual SUPERA el desbalance permisible	

En este módulo se programó la exportación de datos y generación de informe en el botón “Finalizar” el cual antes de limpiar los datos y dirigirse a la interfaz inicial, genera la opción de guardar o no los datos, si la respuesta es positiva se genera el informe y el archivo .csv estos se guardan automáticamente en el escritorio como se menciona en los módulos anteriores.

Figura 3.3.4. Botón finalizar- Módulo de verificación

The screenshot displays the 'APLICACIÓN DE BALANCEO' software interface. On the left is a dark blue sidebar with three menu items: 'BALANCEO', 'DIVISIÓN', and 'VERIFICACIÓN' (which is currently selected). The main area is divided into two columns. The left column contains two sections: 'Información del equipo' with inputs for 'Velocidad de balanceo' (1800 rpm), 'Radio de balanceo' (20 cm), 'Peso del rotor' (200 kg), and 'Grado de calidad' (G 6.3); and 'Información del proceso' with inputs for 'Peso prueba instalado' (200 g), 'Amplitud vector Total' (5), and 'Amplitud vector Final' (2). Below these are 'Salir' and 'Verificar' buttons. The right column, titled 'Resultados', shows 'Desbalance residual' as 16000 g mm and 'Desbalance permisible' as 6684,51 g mm. A red warning box states: 'El proceso de balanceo NO fue eficiente, el desbalance residual SUPERA el desbalance permisible'. At the bottom of this section are 'Limpiar' and 'Finalizar' buttons. A large, light blue curved arrow originates from the 'Finalizar' button and points downwards and to the left.