

Implementación de un Banco de Pruebas Diagnóstico Multifalla en Equipos Rotativos.

Propuesta de Investigación

Jessica Gissella Maradey
Ingeniería Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
jmaradey@unab.edu.co

Carlos Adolfo Forero
Ingeniería Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
cforero3@unab.edu.co

German Andrés Ovalle
Ingeniería Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
govalle3@unab.edu.co

Universidad Autónoma de Bucaramanga

RESUMEN

Este Proyecto comprende el diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas para diagnóstico Multifalla en equipos rotativos, permitiendo aplicar una alta gama de técnicas, clásicos como los análisis de transformada y espectrales, y modernas como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial entre otras.

ABSTRACT

This project includes the design, construction and start-up of a multi-faults diagnostic test bench in rotary equipment, allowing the application of a high range of techniques, such as transform and spectral analysis, and modern techniques such as neural networks, vector support machines among other.

Área de Conocimiento

Ingeniería

Palabras Clave

Multifalla, Reciprocación,

INTRODUCCIÓN

Los equipos industriales, a lo largo de su vida útil sufren distintas desviaciones producto de su degradación y que provocan resultados diversos, como excesivo consumo de aceite lubricante o de energía eléctrica, defectos de calidad del producto, roturas, entre otras, algunas de las cuales pueden ser graves [3].

Entre las fallas comunes en engranajes se encuentran:

- Desgaste de los dientes.
- **Sobrecarga.**
- **Excentricidad / Backlash.**
- **Desalineamiento.**
- **Problemas de Hunting (Problemas leves en la manufactura o manipulación indebida producen que, cuando dos dientes específicos del piñón y el engranaje conducido se encuentren generen vibraciones de choque).**

En bandas o correas pueden aparecer problemas alusivos a problemas de montaje en su mayoría, en la cual la distensión de la correa, el desalineamiento y la excentricidad de la polea generando altos niveles de vibración. Así mismo, puede darse el fenómeno de resonancia [9].

En la última década, la confiabilidad y la seguridad de los procesos industriales han tomado un papel muy importante en el aseguramiento de la competitividad de las empresas nacionales e internacionales, haciendo necesario sistemas de detección on-line y off-line de fallas que aparecen en operación normal, y en otros casos, la implementación de metodologías más robustas para fallas potenciales en busca de preservar la vida útil de los equipos y procurando minimizar los costos de mantenimiento y operativos, logrando mejorar la productividad y desempeño de la maquinaria

rotativa (existente en mayor grado) y maquinaria hidráulica (aplicaciones de media y alta potencia).

El uso de técnicas clásicas y modernas no sólo permitirá realizar análisis comparativos, sino que le brindará versatilidad al equipo y su mejor aprovechamiento como también la confiabilidad de la data al validar experimentalmente los supuestos.

El desarrollo de un banco de pruebas brinda comprobaciones rigurosas, permiten evidenciar y desarrollar en el estudiante capacidades competitivas necesarias en la industria, desarrolla conocimiento científico bajo situaciones controladas, mediante implementación de lenguajes computacionales y de nuevas tecnologías [4].

Con este proyecto se pretende diseñar, construir, instrumentar y poner en marcha un banco de pruebas para diagnóstico multifalla en equipos rotativos continuando con trabajos previamente planteados contribuyendo al fortalecimiento de esta línea de investigación teniendo como base el mantenimiento basado en condición (CBM) y técnicas de inteligencia artificial disponibles para fallas reales o potenciales.

MARCO TEÓRICO

Mantenimiento basado en condición (CBM)

El mantenimiento basado en condición consiste en realizar mediciones sistemáticas de las variables operacionales de una maquinaria o equipo industrial. Al monitorear y registrar, mediante inspecciones periódicas, parámetros claves en el desempeño de una máquina, como variables operacionales, niveles de vibraciones, ruidos ultrasónicos, estado de lubricantes, tiempo entre fallas, es posible obtener patrones o señales que, al analizarlas, permiten determinar la condición del equipo, y de esta manera poder planificar actividades de mantenimiento específicas y programar el momento oportuno para la intervención del activo, antes de que las fallas representen un riesgo para la seguridad personal, el ambiente, la integridad de los equipos y así garantizar la continuidad del proceso productivo[12].

La detección y diagnóstico de problemas en una máquina sin detener su funcionamiento es el método de mantenimiento más conveniente. Según esto, se pueden detectar los problemas anticipadamente cuando los efectos que causan la falla son incipientes y no afectan por lo tanto el funcionamiento del equipo, además permite diagnosticar la naturaleza del problema con la máquina en funcionamiento. El objetivo del monitoreo de la condición de la maquinaria es recopilar el mayor número de datos representativos de su funcionamiento con la finalidad de detectar las fallas en sus primeras etapas. El esquema mostrado en la figura 1 representa el proceso general del mantenimiento basado en condición, el cual inicia con el monitoreo rutinario de los activos [12].



Figura 1. Proceso de Mantenimiento basado en Condición [12].

Entre las ventajas más importantes del mantenimiento basado en condición se encuentran una mejoría notable en la confiabilidad del sistema, los paros para reparaciones pueden ser programados para tiempos que sean convenientes, se evita daño extenso a la máquina producto de la eliminación de fallos forzados, una reducción en el costo de mantenimiento y una disminución en el número de operación de mantenimiento. La desventaja más grande que tiene CBM es el alto costo de instalación del equipo de monitoreo y el incremento en el número de piezas que necesitan revisión y mantenimiento [15].

Técnicas Predictivas

Las tecnologías predictivas son herramientas que permiten detectar con suficiente anticipación cambios en las condiciones mecánicas, eléctricas y operacionales de la maquinaria a través del monitoreo de variables como temperatura, ultrasonido, vibración, entre otras. En los programas de mantenimiento basados en condición, se utilizan distintas herramientas predictivas que permiten inspeccionar aspectos claves, sobre los activos físicos industriales[12].

Algunas categorías del mantenimiento a condición se detallan a continuación [14]:

Medición de temperatura: Ayuda a detectar posibles fallas relacionadas con un cambio de temperatura en el equipo como por ejemplo fricción excesiva mecánica (rodamientos defectuosos o lubricación inadecuada entre otros) y en el caso de la transmisión de energía detección de puntos calientes en conectores ocasionadas por el aflojamiento por vibración o desgastes en los contactos, detección baja de niveles de aceite en equipos inductivos ocasionadas por fugas, pérdidas altas en pararrayos que indican alta resistencia de puesta a tierra.

Monitoreo dinámico: implica la medición y el análisis de la energía emitida por el equipo mecánico en formas de onda tales como vibración, pulsos y efectos acústicos, cualquier desviación en las características puede indicar problemas como desgaste en componentes, desequilibrio, desalineamiento y posibles daños; por ejemplo, medidas de velocidad y desplazamiento en los interruptores mecánicos, entre otras.

Análisis de aceite: se puede emplear para diferentes tipos de aceite tales como lubricantes, hidráulicos y aislantes, este último es muy empleado en los equipos inductivos del sistema de transmisión y se monitorean variables como: contenido de gases combustibles, humedad, partículas en suspensión, rigidez dieléctrica entre otras, dando idea del envejecimiento, necesidades de productos pasivadores o regeneramientos.

Monitoreo de Corrosión: el control de la corrosión (como por ejemplo inspecciones periódicas con cámaras de alta definición)

permite establecer la zona de afectación, la velocidad en la degradación del material y el estado de los componentes, en especial las líneas de transmisión permiten determinar la condición de los cables, herrajes y aislamiento.

Pruebas no destructivas: las pruebas no destructivas implican, la realización de las actividades que son no invasivas para el equipo bajo prueba. Muchas de las pruebas se pueden realizar mientras el equipo está en servicio como, por ejemplo, nivel de ruido en equipo inductivo, pruebas de descargas parciales en aislamiento, respuesta de barrido en frecuencia en el núcleo de los transformadores.

Pruebas Eléctricas: Técnicas de monitoreo de condiciones eléctricas como, por ejemplo, pruebas de factor de potencia, medida de aislamiento, medidas de conductividad entre otras, permiten detectar algunos de los problemas de pérdida del aislamiento eléctrico en equipos.

Técnicas de Análisis de Vibraciones

Existen diferentes técnicas de análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular[13].

- **Análisis espectral:** Se trata de descomponer la señal vibratorio en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales de frecuencia. Para el caso de las máquinas, permite correlacionar las vibraciones medidas generalmente en sus descansos, con las fuerzas que actúan dentro de ella.

- **Análisis de la forma de onda:** En este tipo de análisis se pueden reconocer los siguientes tipos de problemas: impactos, rozamientos intermitentes, modulaciones en amplitud y frecuencias, transientes, truncaciones.

- **Análisis de fase de vibraciones:** Se define la diferencia de fase entre dos vibraciones de igual frecuencia como la diferencia en tiempo o en grados con que ellas llegan a sus valores máximos, mínimos o cero. Se pueden diferenciar distintos tipos de problemas que generan vibraciones a frecuencia $1x$ rpm: Desbalanceo, Desalineamiento, Eje doblado, Resonancia, Poleas excéntricas o desalineadas.

- **Análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo:** Técnico que recolecta señales vibratorias en el dominio del tiempo y las suma y promedia sincrónicamente mediante un pulso de referencia repetitivo. Las componentes sincrónicas al pulso se suman en el promedio y las no sincrónicas disminuyen de valor con el número de promedios.

- **Análisis de órbitas:** combinando dos señales vibratorias captadas por sensores ubicados relativamente entre ellos a 90 grados (vertical y horizontal) en un descanso de la máquina se puede obtener el movimiento del eje en el descanso o su órbita.

- **Análisis de demodulaciones:** Se mide en amplitud y consiste en analizar la envolvente de la señal temporal de una señal modulada. Esta clase de análisis permite determinar más fácilmente la periodicidad de las modulaciones y diagnosticar problemas tales como: rodamientos picados, engranajes excéntricos o con dientes agrietados, deterioro de alabes en turbinas, problemas eléctricos en motores.

- **Transformadas tiempo-frecuencia:** el análisis espectral es adecuado para analizar vibraciones compuestas de componentes estacionarias durante su periodo de análisis. Lo cual indica qué

efectos transientes de la vibración son promediados en el periodo de análisis. Son análisis tridimensionales amplitud-tiempo-frecuencia, es decir, se agrega una nueva dimensión a la clásica transformada de Fourier rápida.

Diagnóstico de Fallas

Las tareas de diagnóstico consisten en la determinación del tipo de falla incluyendo detalles como tamaño de la falla, localización y tiempo de detección. El procedimiento de diagnóstico está basado en los síntomas analíticos y heurísticos observados y en el conocimiento heurístico del proceso. Las entradas de un sistema de diagnóstico de fallas basado en el conocimiento heurístico son todos los síntomas disponibles como hechos y el conocimiento relevante de la falla sobre el proceso. [17].

Los sistemas expertos sirven como soporte para actividades de mantenimiento, son capaces de aportar información valiosa que sirve como insumo informático para la toma de decisiones sobre la implementación de actividades específicas de mantenimiento, sus beneficios al bienestar de los equipos monitoreados son fácilmente comparables con la información que podría aportar un humano experto en diagnóstico de fallas [4].

Para mejorar la calidad de la predicción de fallas se han desarrollado muchas herramientas que no dependen únicamente del análisis del experto, la introducción de las técnicas de inteligencia artificial y las máquinas de aprendizaje entrenadas para diagnosticar posibles fallas y sus severidad, así mismo, es necesario establecer claramente cuáles serán los patrones de reconocimiento, cuáles y cuantos se usarán en el entrenamiento, y en las pruebas, en la medida que se mejore la posición de los sensores también con ello se mejora la precisión del clasificador al disminuir la incertidumbre del proceso [4].

Por lo tanto, métodos avanzados de supervisión, son requeridos para la detección y diagnóstico de fallas los cuales deben satisfacer los siguientes requerimientos [17]:

Detección temprana de pequeñas fallas con comportamiento abrupto o incipiente en el tiempo.

Diagnóstico de fallas en los procesos o partes del proceso y su manipulación, vectores (actuadores) y equipos de medición (sensores).

Detección de fallas en circuitos cerrados.

Supervisión de procesos en estados transitorios.

El éxito para la detección y diagnóstico temprano de fallas es tener suficiente tiempo para contrarrestar efectos en las operaciones, reconfiguración, mantenimiento planeado o reparaciones [17].

En la figura 3 se puede notar algunos métodos para el diagnóstico de fallas. De manera general, podemos encontrar, análisis estadísticos y de probabilidad, lógica fuzzy, redes neuronales, máquinas de soporte vectorial, entre otros.

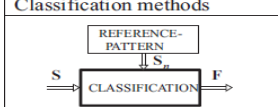
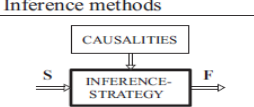
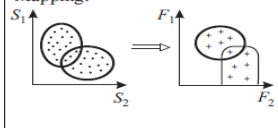
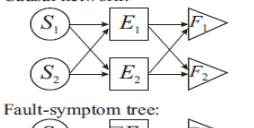
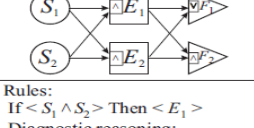
Classification methods	Inference methods
	
<p>Without a-priori knowledge on symptom causalities</p> <p>Mapping:</p>  <p>$S^T = [S_1, S_2 \dots S_n]$ $F^T = [F_1, F_2 \dots F_m]$</p>	<p>With a-priori knowledge on symptom causalities</p> <p>Causal network:</p>  <p>Fault-symptom tree:</p> 
<p>Classification:</p> <ul style="list-style-type: none"> - statistical - geometrical - neural nets - fuzzy clusters 	<p>Rules:</p> <p>If $\langle S_1 \wedge S_2 \rangle$ Then $\langle E_1 \rangle$</p> <p>Diagnostic reasoning:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Boolean logic: facts binary - Approximative reasoning: <ul style="list-style-type: none"> - Probabilistic facts: probability densities - Fuzzy facts: fuzzy sets

Figura 2. Métodos de diagnóstico de fallas [17].

La metodología para diagnóstico de fallas comúnmente incluye las siguientes etapas, de manera general: Adquisición de las señales, procesamiento de las señales, extracción de características, diseño del clasificador y validación experimental o simulación de fallas para verificar la validez de las reglas o algoritmo seleccionado en el paso anterior. Igualmente se pueden usar algunos métodos estadísticos para reducir la dimensionalidad de los vectores y/o matrices de entrada. Sin embargo, su desarrollo suele ser más amplio como puede verse en la figura 4.

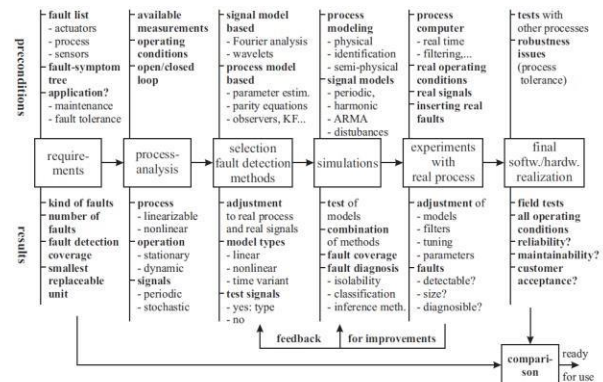


Figura 3. Etapas de desarrollo en el diagnóstico de fallas [17].

OBJETIVOS

General

Implementar un banco de pruebas para simular vibraciones mecánicas en equipos rotativos.

Específicos

- Realizar revisión bibliográfica sobre técnicas de diagnóstico aplicada a maquinaria rotativa.

- Dimensionar, diseñar y seleccionar los equipos y componentes requeridos para la implementación del banco de pruebas.
- Construir el banco de pruebas y validar su desempeño a partir de pruebas experimentales a través de la medición de vibración en operación normal vs condición de falla de cada uno de los componentes (rodamientos, engranajes, bandas, mecanismos recíprocos).
- Realizar la adquisición y procesamiento de las señales en condición normal vs condición de falla seleccionadas para cada componente (rodamientos, engranajes, bandas, mecanismos recíprocos).
- Identificar las fallas a estudiar y seleccionar la técnica de diagnóstico adecuada para cada componente y falla.
- Proponer una guía metodológica para la utilización del equipo.

METODOLOGÍA

El plan previsto para el desarrollo de este proyecto de investigación está basado en los objetivos planteados anteriormente. Las actividades por desarrollar se detallan a continuación:

Recopilación Bibliográfica

- Búsqueda bibliográfica y estudio preliminar sobre análisis de vibraciones para identificar fallas de desalineamiento y desbalanceo.

Diseño, Selección y Construcción del banco de pruebas

- Dimensionar los componentes del banco (motor, estructura, eje, rodamientos, acoples, masas).
- Seleccionar componentes mecánicos e instrumentación (sensores, tarjeta de adquisición de datos).
- Fabricación de componentes (eje, masas, estructura).
- Montaje del banco.
- Protocolo de simulación de fallas.

Adquisición de datos y Procesamiento de la señal

- Montaje de la instrumentación.
- Implementación de la interfaz en LabView o Matlab.
- Calibración y puesta en marcha del banco.
- Pruebas.
- Procesamiento de la señal.

Identificación de las fallas y Selección de la Técnica de Diagnóstico

- Seleccionar 2 fallas para cada componente del banco
- Diseñar el clasificador de acuerdo con la técnica seleccionada.
- Identificación de las fallas de desalineamiento y desbalanceo.
- Conclusiones.

Desarrollo de Guía Metodológica

- Realización de Guías para el desarrollo de prácticas en el banco de pruebas implementado.

Difusión científica

- Elaboración de los artículos científicos para enviarse a diferentes congresos y revista de carácter nacional e internacional.

Elaboración de la memoria final

- Elaboración de la memoria explicativa de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, incluyendo planos detallados de la solución desarrollada.

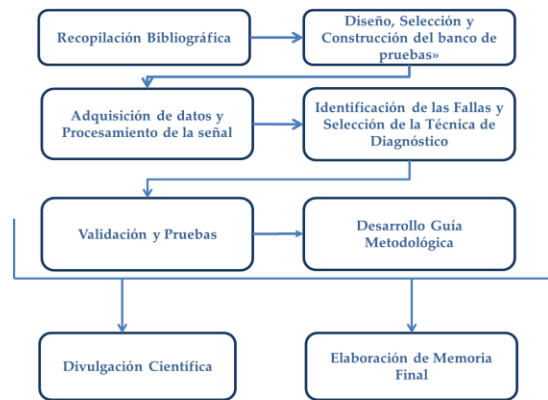


Figura 4. Metodología del proyecto

CRONOGRAMA

Actividad	Duración en Meses					
	4	8	12	16	20	24
Recopilación Bibliográfica	■					
Diseño, Selección y Construcción del banco de Pruebas	■	■				
Adquisición de datos y procesamiento de la señal			■			
Identificación de Fallas y Selección de la Técnica de Diagnóstico			■	■	■	
Validación y Pruebas				■	■	
Desarrollo Guía Metodológica						■
Difusión Científica						■
Elaboración de la memoria final						■

Figura 5. Cronograma de Actividades

IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Nombre del Semillero	Semillero de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica (SIDEM)
Tutor del Proyecto	Implementación de un Banco de Pruebas Diagnóstico Multifalla en Equipos Rotativos
Grupo de Investigación	GYCIM

Línea de Investigación	Diseño Mecatrónico
Fecha de Presentación	6 de Octubre de 2017

REFERENCIAS

[1] [Online]

http://www.bureauveritas.com.mx/services+sheet/service_sheet_10496.

[2] Sueiro, G., “Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)”, *Revista Tecnología-Mantenimiento*, (4), pp.14–16.

[3] Gangi, S., Pontelli, D., Ingaramo, R., Meneguzzi, F., Reartes, L., Aguilar, M., 2014, “Bancos de Ensayo de Equipos Electromecánicos para la Formación de Alumnos en el Uso de Herramientas del Mantenimiento Industrial,” *Rev. Fac. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, **1** (1), pp. 71–78.

[4] Castañeda, M., 2014, “Diagnóstico de Fallas en Maquinaria Rotativa por Análisis de Vibraciones Basado en Máquinas de Soporte Vectorial”, BSc. Thesis, Universidad Industrial de Santander, Col.

[5] Nieto, J., Niño, A., 2013, “Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas de Vibraciones Mecánicas que Reproduzca Tres Fallas Características: Desalineamiento, Desbalanceo y Paso de Dientes”, BSc. Thesis, Universidad Industrial de Santander, Col.

[6] Rojas, I., 2012, “Desarrollo de un Banco de Pruebas para Simular Vibraciones Mecánicas en Equipos Rotativos”, BSc. Thesis, Universidad Simón Bolívar, Ven.

[7] Cárdenas, J., 2011, “Diseño, Construcción y Pruebas de un Banco para Análisis de Vibraciones”, BSc. Thesis, Universidad Austral de Chile, CL.

[8] Hincapié, G., 2013, “Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para Mecanismos Manivela-Deslizador”, BSc. Thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Col.

[9] Rossas, G., 2004, “Estudio de Vibraciones Mecánicas en Máquinas Recíprocas”, BSc. Thesis, Universidad Industrial de Santander, Col.

[10] Estupiñán, E., Saavedra, P., “Técnicas de Diagnóstico para el Análisis de Vibraciones de Rodamientos”,

http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/galileo.dim.edec.cl%20lmv/articulo_rodamientos_CHILE1.pdf

[11] Gustavo, R., Torres, J., and Díaz, S., 2008, “Caracterización de un banco de pruebas para la enseñanza de vibraciones mecánicas,” *Revista Ciencia e Ingeniería*, **29**(3), pp. 285–292.

[12] Mundarain, C., 2009, “Diseño de un Programa de Mantenimiento Basado en Condición, enfocado a la Mejora de la Efectividad de los Activos Rotativos”, BSc. Thesis, Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, VEN.

[13] Saavedra, P., “La Medición y Análisis de las Vibraciones como Técnica de Inspección de Equipos y Componentes, Aplicaciones.”, Universidad de Concepción, CL.

[14] Martínez, L., 2014, “Metodología para la definición de tareas de Mantenimiento basado en Confiabilidad, Condición y Riesgo aplicada a equipos del Sistema de Transmisión Nacional”, BSc. Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Col.

[15] Álvarez, J., 2015, “Diseño, Construcción y Modelado de un Banco de Pruebas para el Estudio de las Vibraciones Generadas por Desbalanceo de Rotores en Voladizo”, Bsc. Thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Col.

[16] Gani, A., Salami, M., 2004, “Vibration Faults Simulation System (VFSS): A Lab Equipment to aid Teaching of Mechatronics Courses”, *Int. J. Engng Ed.*, **20**(1), pp.61–69.

[17] Isermann, R., 2011, “Fault-Diagnosis Applications”, Springer, DE, pp.1-358.

[18] Magraoui, R., Ouali, M., Temmar, M., 2015, “Experimental and Theoretical Study of an Industrial Rotary Machine”, *ICEMIS’15*, pp. 1-5.

[19] Sandoval, C., Barros, A., Herreño, S., 2013, “Clasificación Automática de Patrones de Vibraciones Mecánicas en Maquinaria Rotativa afectada por Desbalanceo”, *Revista IngeUan*, **4**(7), pp.29-35.

[20] Romero, C., Arroyave, J., Vanegas, L., 2014, “Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para el Ensayo de Transmisiones por Engranajes”, 2nd International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology – AMDM, **1**(1), pp. 9-16.

[21] Castro, Y., Páez, E., 2008, “Banco Experimental para Estudio de Fallas en Rodamientos Mediante Análisis de Vibraciones”, BSc. Thesis, Universidad Industrial de Santander, Col.

[22] Briggs, Y., 2009, “Diseño de un Banco de Prueba de Balanceo Dinámico para ser usado con Fines Didácticos en la Formación de Ingenieros y Tecnólogos de la U.D.O.-Anzoátegui”, BSc. Thesis, Universidad del Oriente núcleo Sucre, VEN