 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE LOS GENERADORES-ARRANCADORES UTILIZADOS EN MOTORES TURBOHÉLICE DE AVIONES

Andrés Felipe Hurtado Sánchez

Ingeniería Electromecánica

Luz Adriana Trejos Grisales

Docente asesor

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Junio de 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. RESUMEN

En este trabajo se realizará el diseño conceptual y el diseño de detalle de un banco para realizar pruebas de funcionamiento a los generadores-arrancadores utilizados en los motores turbohélice de aviones. Para realizar el diseño conceptual, se dividirá el banco de pruebas en subsistemas y se evaluarán las mejores alternativas de solución para cada subsistema. Para realizar el diseño de detalle se hará el dimensionamiento de las partes que componen cada uno de los subsistemas y se consultarán las dimensiones de las partes comerciales. Al final del trabajo se obtendrán los planos generales del dispositivo, una descripción del funcionamiento de cada uno de sus sistemas y del dispositivo en general, así como los planos de construcción de cada una de las partes que compone el banco para realizar pruebas a los generadores-arrancadores utilizados en motores turbohélice de aviones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo la dirección de la docente Luz Adriana Trejos Grisales, a quien me gustaría expresar mi agradecimiento, por hacer posible la realización de este trabajo, agradecer su paciencia, tiempo y dedicación que tuvo para que este trabajo se desarrollara de una manera exitosa.

Agradezco a las empresas Preciso Electrónica y Aerolíneas de Antioquia, las cuales me alentaron y facilitaron diversos componentes para realiza pruebas y tomar mediciones de ellos y así elaborar un trabajo con datos reales y ajustado a las necesidades del mercado local.

Por ultimo agradecer a la institución ITM por todos los años de enseñanza y por permitir a sus estudiantes el uso de todos los recursos, tales como talleres y laboratorios para dar vía libre a la imaginación e inventiva. También agradezco a mi familia, a mi esposa, hija y padres por la paciencia y apoyo en este trabajo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. ACRÓNIMOS

AC Alternating Current (Corriente alterna)

DC Direct Current (Corriente directa)

FEM Fuerza electromotriz

GCU Generator control unit (unidad de control del generador)

RPM Revoluciones por minuto

THD Total Harmonic Distortion (Distorsión armónica total)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	2
2. RECONOCIMIENTOS.....	3
3. ACRÓNIMOS.....	4
4. INTRODUCCIÓN	8
5. MARCO TEÓRICO	9
5.1 Estado del arte.....	9
5.2 Generador - Arrancador	10
5.3 Generador de electricidad básico	11
6. OBJETIVOS.....	14
6.1 General.....	14
6.2 Específicos.....	14
7. METODOLOGÍA.....	15
7.1 División por subsistemas.....	15
7.2 Evaluación de principios de solución	16
7.3 Esquema final de diseño conceptual	17
7.4 Diseño de detalle.....	18
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
8.1 Especificaciones generales del banco de pruebas.....	19
8.2 Diseño conceptual	20
8.2.1 Sistema de soporte.....	21
8.2.2 Sistema generador de giro.	23
8.2.3 Sistema de medición e indicación.....	32
8.2.4 Sistema de cargas eléctricas y control del banco	33
9. CONCLUSIONES.....	36
10. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	37
REFERENCIAS.....	38
APÉNDICE	39

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Generador-arrancador. (Corporation., 2003)	11
Figura 2 Generador básico.(García, 2008).....	12
Figura 3. Generador elemental con conmutador. (Kosow, 1993).....	13
Figura 4 Guaya para control de aceleración usada en aviación (tomada de Aircraft Spruce & Specialty Co.).....	25
Figura 5 Motor de combustión interna y sus partes. (Tomado de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx)	26
Figura 6 Grafica para selección de tipo de banda (tomada del catálogo de poleas en “v” de Intermec).....	28
Figura 7 Elementos de un engranaje (diseño IZANTUX).	30
Figura 8 Conexión del sistema de indicación de RPM.....	32
Figura 9 Simulación de las resistencias.	34
Figura 10 Relé de batería de aviación (tomada de Aircraft Spruce & Specialty Co.).....	35

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones de algunos generadores-arrancadores.....	17
Tabla 2 Requerimientos del banco de pruebas.....	18
Tabla 3 Sistemas del banco de pruebas.	21
Tabla 4 Perfil tubular estructural de CORPACERO.	21
Tabla 5. Características de las pinturas.	22
Tabla 6 Propiedades físicas de algunas aleaciones de aluminio.	23
Tabla 7 Capacidad de corriente de los conductores para aparatos (tomado de la tabla 402-3 de la norma NTC-2050).	23
Tabla 8 Datos técnicos del motor.....	26
Tabla 9 Potencia por banda (tomada del catálogo de poleas en “v” de Intermec).	29
Tabla 10 Calculo de resistencias.....	33

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. INTRODUCCIÓN

El sector aeronáutico es una de las industrias que requiere que sus procesos de mantenimiento tengan estándares de calidad muy elevados, es por esto que las aerolíneas requieren que todos los componentes que puedan afectar la aeronavegabilidad se estén chequeando cada cierto tiempo de operación y que además, los talleres donde son probados los componentes cuente con la herramienta idónea y calibrada para realizar tales ensayos.

La empresa Aerolíneas de Antioquia SA, así como el resto de las aerolíneas que operan en este país, incluso la Fuerza Aérea Colombiana, deben enviar la mayoría de sus componentes al exterior a talleres que posean los equipos necesarios para realizar dichas pruebas. Esto, representa un alto costo para las empresas colombianas, puesto que todas las transacciones monetarias deben hacerse en dólares americanos, lo que representa un aumento muy significativo en los costos de mantenimiento. Los Generadores-Arrancadores son uno de los componentes primordiales en la aeronave, ya que son los encargados de proveer la energía y de dar arranque a las turbinas de una forma adecuada para que estas no lleguen a quemarse por exceder el límite de temperatura permitido por diseño de los motores o por exceder el tiempo que una turbina puede estar con alta temperatura en la cámara de combustión.

Con el banco para realizar pruebas a los Generadores-Arrancadores de aeronaves, la empresa estaría mejorando sus estándares de calidad, ya que con este se tendría la facilidad de hacer los mantenimientos en la misma empresa y de esta manera medir y evidenciar el comportamiento de los Generadores-arrancadores en cuanto a la potencia requerida versus revoluciones entregadas en modo arrancador y su capacidad de generar potencia eléctrica en modo generador, brindaría una mayor confiabilidad a sus pasajeros, pues se estaría garantizando que el componente que se instaló en la aeronave cumple con las expectativas de potencia eléctrica requeridas por el fabricante y ahorraría una buena suma de dinero y tiempo, además de dar un impulso a la industria aeronáutica colombiana. En este trabajo se realizarán el diseño conceptual y de detalle del banco para efectuar pruebas a los Generadores-Arrancadores usados en aeronaves, que sea de bajo costo y viable de fabricar usando la tecnología local.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Estado del arte

A través de los años, la demanda de potencia eléctrica en los aviones ha ido incrementando considerablemente, nuevas tecnologías en aviónica y sistemas de entretenimiento requieren de fuentes de energía con más potencia. Desde el 2005 se ha empezado a hablar de “aviones más eléctricos (more electric aircraft)” (Song Shoujuna, 2009), donde diferentes sistemas mecánicos se han ido combinando con controles electrónicos y en muchos casos reemplazados totalmente por sistemas eléctricos y electrónicos, tales como actuadores de superficies, los cuales solían ser hidráulicos y hoy en día pueden ser reemplazados por actuadores eléctricos.

Song Shoujun et al (2009) en su artículo, describen los conceptos básicos de “aviones más eléctricos” y detallan el diseño de una máquina de reluctancia conmutada a alta velocidad para que opere como un generador-arrancador. El proceso de diseño lo dividieron en dos etapas: diseño electromagnético y diseño térmico. Las características de la máquina fueron verificadas en computador y para conseguir las mayores prestaciones, los ángulos de excitación fueron optimizados en los dos modos de operación separadamente y como un ejemplo, muestran las características optimizadas en modo arrancador.

Por otro lado, A. Eid et al (2008) en su artículo, presentan una simulación y un análisis de los transitorios de un sistema convencional y avanzado de un sistema eléctrico aeronáutico con mitigación de armónicos. El sistema eléctrico convencional fue analizado considerando cargas pasivas equivalentes en Corriente alterna (AC por sus siglas en inglés) y en Corriente directa (DC por sus siglas en inglés) bajo condiciones transitorias y en estado estable. Para mitigar los armónicos generados por los convertidores, se diseñaron filtros pasivos para mantener los valores de THD (Total Harmonic Distortion) dentro de los límites estándar. Los sistemas eléctricos aeronáuticos avanzados son más confiables, eficientes y con menos consumo de potencia. Concluyen que, en los sistemas eléctricos aeronáuticos convencionales, se requiere solo de un filtro de armónicos, mientras que para los sistemas avanzados, se requiere de dos filtros de armónicos (uno en el generador y otro en las barras de carga de corriente alterna AC). Adicional a lo investigado en este artículo, estudiaron el control de los armónicos utilizando filtros activos empleando el método de cancelación de armónicos, lo cual resultó en la disminución de armónicos en ambos sistemas, avanzado y convencional a valores dentro de los límites estándar de IEEE-519 y MIL-STD-704E (A. Eida, Active power filters for harmonic

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cancellation in conventional and advanced aircraft electric power systems., 2008), y concluyen que los filtros activos son más eficientes y flexibles que los filtros pasivos para armónicos en los sistemas eléctricos aeronáuticos.

En los párrafos anteriores podemos evidenciar el avance en las investigaciones en referencia a la generación y control de la energía usada en las aeronaves, así como la necesidad de que esta sea lo más estable posible para los diferentes sistemas que hacen uso de ella. Pero todo esto es solo el diseño y la construcción de los dispositivos que generan y controlan la energía, poco se habla del mantenimiento que se debe hacer a estos dispositivos, en especial a la raíz del sistema, los generadores. Esta máquina eléctrica, como cualquier otra máquina está sometida a desgaste por fricción, sobrecalentamiento, cortos en el sistema que alimenta y daños generados por los técnicos quienes los manipulan a la hora de hacerles mantenimiento. Debido a los estándares de calidad y seguridad manejados en la aviación, es necesario garantizar que todos los componentes estén en óptimas condiciones para que sean instalados en las aeronaves. Tal es el caso de los Generadores-Arrancadores, las cuales deben estar en óptimas condiciones para dar un arranque seguro a la turbina y posteriormente brindar energía de calidad a los diferentes sistemas. En este trabajo se pretende diseñar un dispositivo con el cual se pueda determinar el estado de esta máquina, que sea de bajo costo y versátil, puesto que las máquinas diseñadas hasta ahora, tienen un costo muy elevado y la reparación de las mismas es casi imposible debido a lo costoso de los repuestos.

A continuación se hará una breve descripción del Generador-Arrancador y se definirán los conceptos básicos de generación de energía, de este modo se entenderá mejor lo que se pretende con el dispositivo de pruebas y lo que se requiere para diseñarlo.

5.2 Generador - Arrancador

Con el desarrollo tecnológico de los últimos tiempos, el sector aeronáutico ha creado la necesidad de que la electricidad generada en las aeronaves, usada para energizar los diferentes sistemas de navegación, comunicación y control de la misma, sea la más confiable posible. Esto quiere decir, que en el caso de que una fuente de energía, como lo son los Generadores-Arrancadores, llegue a fallar, el generador restante sea capaz de proveer la energía necesaria para que la aeronave continúe volando con todos sus sistemas operativos. Además de lo mencionado anteriormente, la durabilidad y confiabilidad de las turbinas usadas para propulsar la aeronave, dependen de un correcto encendido de las mismas, ya que en el encendido de estas se generan temperaturas al

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

interior de hasta 760°C, temperaturas que si son excedidas o mantenidas por mucho tiempo, generarían daños en la turbina y podrían llegar a quemarse.

Este dispositivo no es más que un motor de corriente directa con bobinados en el estator y el rotor, con los cuales, dependiendo de la forma como se exciten dichas bobinas, va a funcionar como un motor para dar arranque a la turbina o como un generador para suministra energía a las baterías y todos los demás sistemas de la aeronave, a un nivel de tensión de 28VDC. En el modo arranque, se energiza al dispositivo de manera que cuatro electroimanes que están fijos en el estator se repelen con cuatro electroimanes que se forman en la armadura. El campo magnético que generan esos electroimanes hace que se genere un movimiento tal que los contactos (los carbones-Escobillas) seleccionan otro juego de cuatro electroimanes en la armadura y así se genera el movimiento continuo. En el modo generador, se energizan los electroimanes fijos, los cuales generan un campo electromagnético y alternativamente en el rotor se van conmutando cuatro bobinas, que son las que mejor ubicación tienen para aprovechar el campo y así generar electricidad, dicho ciclo de conmutación es el que mantiene un flujo de corriente continuo. Ver Figura 1 Generador-arrancador.

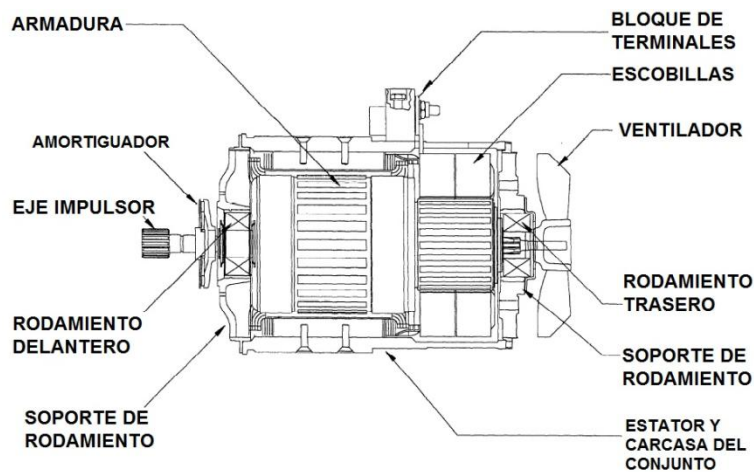


Figura 1 Generador-arrancador. (Corporation., 2003)

5.3 Generador de electricidad básico

El principio de funcionamiento de los generadores se basa en el fenómeno de inducción electromagnética, ley de Faraday, esta ley dice que el voltaje inducido en un circuito es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en un conductor o espira, es decir, que si se hace girar una espira de alambre dentro de un campo magnético uniforme,

el campo magnético inducirá en la espira una fuerza electromotriz capaz de producir una corriente eléctrica alterna, ver Figura 2 Generador básico.

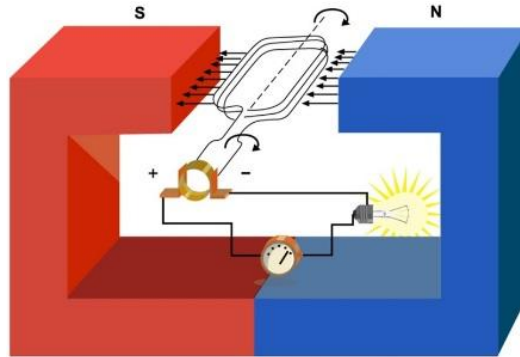


Figura 2 Generador básico.(García, 2008)

Puesto que la corriente que se genera en este tipo de dispositivo es alterna y la usada en la aeronave es corriente directa, es necesario rectificar la corriente y esto lo hacen por medio de la conmutación. Explicado desde el principio básico, el conmutador consiste de dos segmentos, asegurados y aislados del eje de la armadura (rotor) y entre sí. Cada segmento conductor del conmutador está conectado a su respectivo lado de la espira. Ya que ambos están unidos mecánicamente al eje, la acción de la rotación mecánica es invertir la espira de la armadura (rotor) y las conexiones con el circuito exterior estacionario en el mismo instante en el que se invierte la FEM inducida en el lado de la espira, es decir, cuando el lado de la espira se mueve bajo un polo de signo contrario.

Como se muestra en la Figura 3, el lado ab de la espira está conectado con el segmento 1 del conmutador, y el lado cd al segmento 2. Por tanto, para los primeros 180° de rotación, la FEM positiva que produce el lado ab de la espira se conecta a la escobilla estacionaria positiva. Durante los segundos 180° de rotación, la FEM negativa que se produce en el lado ab de la espira está conectada a la escobilla estacionaria negativa. El mismo efecto se lleva a cabo en el lado cd de la espira pero de manera inversa. La acción del conmutador es invertir las conexiones con el circuito externo simultáneamente al mismo instante en que se invierte la FEM en cada lado de la espira. Cada escobilla, positiva o negativa, siempre se mantiene con la misma polaridad. La Figura 3. **Generador elemental con conmutador.** muestra la onda FEM (y de corriente) que se produce como resultado de la conmutación en una rotación de 360° . (Kosow, 1993)

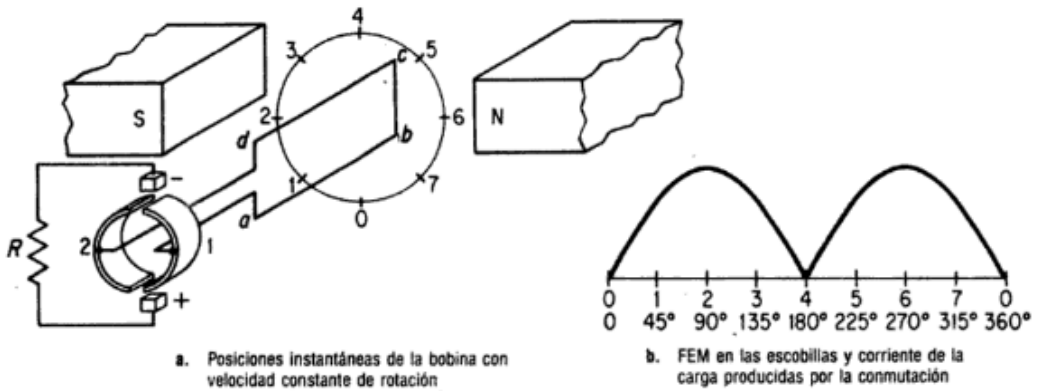


Figura 3. Generador elemental con conmutador. (Kosow, 1993)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. OBJETIVOS

6.1 General

Diseñar un banco para realizar pruebas de verificación a los generadores-arrancadores usados en los motores turbohélice de aviación.

6.2 Específicos

- Identificar el principio de funcionamiento de los generadores-arrancadores usados en la aviación, de los motores de corriente directa y los subsistemas que lo componen.
- Definir los requerimientos mecánicos y eléctricos de un banco para realizar pruebas a los generadores-arrancadores de sistemas aeronáuticos.
- Elaborar los planos de construcción (diseño de detalle) de los subsistemas y dispositivos que componen el banco para realizar pruebas a los generadores-arrancadores de sistemas aeronáuticos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

7. METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología de diseño conceptual descrita por Pahl y Beitz (1995). Ellos definen el diseño “como una actividad que afecta a casi todas las áreas de la vida humana, utiliza leyes de la ciencia, se basa en una experiencia especial y define los requisitos para la realización física de la solución”. Esta metodología propone dividir el sistema a diseñar en subsistemas e identificar las soluciones comerciales existentes y las características del dispositivo requerido por la empresa, basándose en los datos técnicos de los generadores usados en diferentes aviones, tales como el Dornier 328, Jetstream 32, Beechcraft C90 y Pilatus PC12NG. Posteriormente, se procede a seleccionar las capacidades de los subsistemas con el fin de satisfacer las demandas actuales y futuras del producto y la empresa. Una vez identificadas las mejores soluciones, se procede con el dimensionamiento de cada uno de los dispositivos y elementos hasta llegar a los planos de construcción del banco de pruebas. Para la elaboración de los planos se utilizará software de diseño mecánico y simulaciones, Inventor, Solidworks y Proteus, con el fin de evidenciar los puntos de fatiga de los materiales, sobre todo de los ejes de la transmisión de engranajes, además se usará software de diseño eléctrico y electrónico para la elaboración de los planos de conexión eléctrica del banco y la simulación de las cargas puestas al generador para su verificación.

7.1 División por subsistemas

- 7.1.1 Estructura de soporte:** Esta estructura, además de servir de soporte a los diferentes sistemas, puede ser usado como banco de trabajo para desensamble de los generadores-arrancadores que aquí se someterán a prueba.
- 7.1.2 Sistema generador de giro:** Este sistema es el encargado de generar las revoluciones necesarias para que los componentes aquí sometidos a pruebas tengan las revoluciones mínimas requeridas para que inicie la generación de electricidad. Estas revoluciones deben ser controladas y medidas para evitar daños en los rodamientos y eje de acople de los elementos sometidos a prueba.
- 7.1.3 Sistema de medición e indicación:** Son los elementos encargados de las mediciones de los diferentes parámetros que involucran la realización de la prueba, tales como voltajes, corrientes y revoluciones a las cuales se encuentra

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

girando el banco de pruebas, así como también las luces de indicación de configuración del banco.

7.1.4 Sistema de cargas eléctricas: Este sistema es el encargado de hacer que el generador sea forzado a producir más corriente, por medio de estas cargas eléctricas se prueba la capacidad de generación de energía y el correcto funcionamiento de la rectificación por conmutación que usan estos generadores.

Con el fin de establecer los parámetros del diseño conceptual se implanta el siguiente procedimiento:

- Para el diseño del banco de pruebas se debe tener en cuenta el rango de revoluciones más alto requerido por los diferentes generadores sometidos a prueba, así como la capacidad de corriente máxima generada por cada uno.
- Los instrumentos de medida deben tener buena precisión para garantizar que las condiciones bajo las cuales se está probando el componente sean las óptimas y de esta manera evitar generar daños por sobrecarga de corriente o por pasar los límites de revoluciones que cada generador es capaz de soportar.
- El control de revoluciones y el control de cargas deben ser de fácil manipulación con el fin de ajustar los parámetros sin llegar a generar daño por sobrecarga de corriente o sobrepasar los límites de revoluciones.

7.2 Evaluación de principios de solución

Una vez se realizó la división por sistemas y teniendo en cuenta los requerimientos de algunos de los generadores usados en las aeronaves de la empresa Aerolíneas de Antioquia SA y otro consultados en internet con los fabricantes, se elaboró una tabla de requerimientos (ver Tabla 1) y se identificaron los mejores principios de solución, se tuvo presente que los componentes y materiales fueran asequibles en el mercado local.

Potencia nominal (kW)	Corriente (A)	Voltaje (Vdc)	Velocidad (RPM)	Corriente de arranque (A)	Voltaje de arranque (Vdc)
4,8	160	28	8000-12150	300	20

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6	200	28	7000-12150	400	20
9	300	28	4500-12300	600-750	16-18
12	400	28	7000-12800	800-900	16-20

Tabla 1 Especificaciones de algunos generadores-arrancadores.

Sin llegar a sobredimensionar los componentes de cada sistema, estos fueron seleccionados con un margen de operación bastante amplio para no sobrecargarlos en algún momento dado de la prueba.

7.3 Esquema final de diseño conceptual

Una vez se evaluaron los principios de solución, se realizó un esquema del diseño conceptual y se elaboró una tabla de requerimientos del banco de pruebas, la cual se muestra a continuación.

Ítem	Unidad de medición	Cantidad
Energía de alimentación	Voltios (V)	220
Frecuencia de alimentación	Hertz (Hz)	60
Control de velocidad electrónico para el motor	Unidades	1
Motor de combustión interna	Unidades	1 motor que proporcionará el giro.
Salida mecánica de velocidad de giro	RPM	1 salida de hasta 13000rpm.
Resolución del indicador electrónico de velocidad	RPM	25
Exactitud del indicador de RPM	RPM	±5
Medidor de voltaje.	Voltios DC (VDC)	0-30
Medidor de amperaje.	Amperios A (ADC)	2; 0-15 / 0-1000
Banco de resistencia de carga	Ohm (Ω)	1,12; 0,56; 2 x 0.28; 0,14
Técnicos necesarios para la operación del banco	Personas	1
Tiempo de adiestramiento necesario	Horas	1
Duración de la prueba	Horas	1.5
Mantenimiento requerido	Horas	1 (Cada 100 horas de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

		operación).
Dimensiones		
Largo	Ancho	Alto
80cm	65cm	90cm la mesa 130cm final del panel

Tabla 2 Requerimientos del banco de pruebas.

7.4 Diseño de detalle

El diseño del banco se realizó en base a las mediciones realizadas a un generador-arrancador en el laboratorio y a las condiciones, estipuladas en los manuales de mantenimiento, que se requieren para realizar pruebas de funcionamiento de cada uno de las maquinas que en éste se probarán. Para lograr tal cosa, se describieron las características globales del banco y se describió el funcionamiento del banco. Una vez realizado lo anterior, se procedió a seleccionar cada uno de los elementos comerciales que harán parte del banco de pruebas y que darán solución, con muy buen margen de dimensionamiento, a cada uno de los requerimientos listados en la Tabla 2 Requerimientos del banco de pruebas.

Los planos detallados de las piezas que fueron diseñadas y los planos de los subsistemas que conforman el banco de pruebas se elaboraron usando software de diseño mecánico y se reportaron las memorias de cálculo de los elementos que requirieron ser diseñados.

Teniendo en cuenta que los generadores-arrancadores que se probarán son de un peso considerable, se concibió en dimensionamiento del banco de pruebas teniendo en cuenta la comodidad y la seguridad de la persona quien lo va a operar, pues elementos giratorios incorporados en el banco podrían ocasionar lesiones a la persona.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Especificaciones generales del banco de pruebas

Una vez investigado el funcionamiento de los generadores-arrancadores en los manuales de mantenimiento de varios modelos de aviones tales como el Jetstream 32, Dornier DO-328, ATR 42, Pilatus PC12-E y algunos KingAir, y de acuerdo a los requerimientos de los manuales de reparación de los generadores-arrancadores y con la Tabla 1 Especificaciones de algunos generadores-arrancadores., se hace una descripción general de los requerimientos mínimos del banco de pruebas necesarios para cumplir con las condiciones requeridas para que el generador pueda ser probado con seguridad, es decir, que no se generen daños en el generador-arrancador y que los resultados de las pruebas no sean datos ficticios.

El banco de pruebas debe contar con un motor que impulse todo el sistema, este debe tener una potencia mínima de 60HP (caballos de fuerza) que será suficiente para impulsar una caja de engranajes multiplicadora la cual elevará la velocidad de entrada de más o menos 3700RPM a un promedio de 12500RPM en la salida donde estará acoplado el generador-arrancador que será sometido a prueba. El control de aceleración de este motor se llevara a cabo de manera mecánica por medio de guaya. Debe contar con circuito electrónico para el control del campo del generador, encargado de excitar los polos del mismo y así producir la electricidad requerida por el sistema de cargas, también debe contar con un banco de resistencias las cuales actuaran como cargas para el generador y de esta manera probar su capacidad de corriente. Para realizar las pruebas como arrancador, el banco debe contar con una batería de 24Vdc, un contactor de alta corriente y un cableado que sea capaz de soportar la cantidad de corriente demandada por el generador-arrancador cuando se conecta la batería al arrancador por medio del contactor de arranque. Para asegurar que la batería permanezca con una carga de corriente optima, es necesario incorporar un cargador de baterías de 24Vdc de una capacidad de corriente mínima de 10A, de esta manera se asegura una batería cargada en todo momento. Para poder determinar el estado del generador-arrancador en cada uno de sus modos de operación, es necesario instalar instrumentos de medida de voltaje y corriente, los cuales ayudaran en los cálculos de potencia requerida o generada por el generador-arrancador sometido a prueba.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

8.2 Diseño conceptual

Realizando el análisis de los datos consignados en la Tabla 1 y Tabla 2, además con la división del banco por sistemas que se había realizado con anterioridad, se hace la división de los sistemas en los diferentes subsistemas involucrados en el funcionamiento del banco de pruebas y se agrega una prioridad para cada uno con relación al funcionamiento del mismo. A continuación se muestra en la Tabla 3 la división de los sistemas y sus subsistemas.

Ítem	Prioridad del sistema	Descripción
1	Esencial	Sistema de soporte
Subsistemas		
1.1	Necesario	Estructura de tubo cuadrado.
1.2	Esencial	Estructura de soporte para el motor y la caja multiplicadora.
1.3	Esencial	Soporte para el generador-arrancador.
2	Esencial	Sistema generador de giro
Subsistemas		
2.1	Necesario	Conexión de alimentación eléctrica.
2.2	Necesario	Sistema de protección y desconexión del equipo.
2.3	Esencial	Control de velocidad mecánico.
2.4	Esencial	Motor de combustión interna.
2.5	Esencial	Conexión del motor con la caja de engranajes multiplicadora.
2.6	Esencial	Caja de engranajes multiplicadora.
2.7	Esencial	Cargador de baterías de 24Vdc.
2.8	Esencial	Baterías de 24Vdc.
2.9	Esencial	Contactador para el modo arrancador.
3	Esencial	Sistema de medición e indicación
Subsistemas		
3.1	Necesario	Indicador de RPM electrónico.
3.2	Necesario	Voltímetro de 0-30Vdc.
3.3	Necesario	Amperímetros de 0-15A y de 0-1000A.
3.4	Necesario	Bombillos piloto de indicación.
4	Esencial	Sistema de cargas eléctricas y control del banco
Subsistemas		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1	Necesario	Banco de resistencias de carga.
4.2	Necesario	Contactores de selección de resistencias de carga.
4.3	Necesario	Interruptores de selección de cargas.
4.4	Necesario	Interruptores de control y selección de funciones.

Tabla 3 Sistemas del banco de pruebas.

A continuación se realiza la descripción de cada uno de los subsistemas y se escogen los materiales y componentes que darán solución a los requerimientos del banco establecidos en la Tabla 1 Especificaciones de algunos generadores-arrancadores. y la Tabla 2 Requerimientos del banco de pruebas.

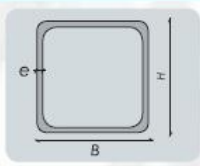
8.2.1 Sistema de soporte.

8.2.1.1 Estructura de tubo cuadrado: esta estructura es la encargada de darle forma al banco de pruebas, además de ser el soporte principal de todos los subsistemas. El material de construcción es acero fabricado bajo la norma ASTM A500 grado C, cuya composición química exigida es: Carbono © 0.23%, Manganeso (Mn) 1.35%, Fósforo (P) 0.035% y Azufre (S) 0.035%. Las dimensiones de la tubería 60mm x 60mm x 3mm, mostradas en la Tabla 4, proporcionadas por la empresa CORPACERO en su lista de producto mostrada a continuación.

ELEMENTO	Composición química exigida por la Norma A500 Grado C para la Materia Prima	Exigido por la Norma A500 Grado C (%)	
		Circulares	Cuadrados
Carbono (C) máx	0,23		
Manganeso (Mn) máx	1,35		
Fósforo (P) max	0,035		
Azufre (S) max	0,035		
		Fy (ksi)	46
		Fu (ksi)	62
		Elongación (%) min.	21 (en 2")

PROPIEDADES PTEC® CUADRADA (A500 GRADO C) (Producido en Planta Bogotá)*

PERFIL	H (mm)	B (mm)	e nominal (mm)	Peso (kg/m)	Área (cm²)	Ix = Iy (cm⁴)	Sx = Sy (cm³)	Zx (cm³)	J (cm⁴)
PTEC 50 mm x 50 mm x 3.0 mm	50	50	3,0	4,25	5,41	19,49	7,80	9,39	31,97
PTEC 60 mm x 60 mm x 2.0 mm	60	60	2,0	3,56	4,54	25,15	8,38	9,79	39,73
PTEC 60 mm x 60 mm x 2.5 mm	60	60	2,5	4,39	5,59	30,35	10,12	11,93	48,54
PTEC 60 mm x 60 mm x 3.0 mm	60	60	3,0	5,19	6,61	35,16	11,72	13,95	56,89
PTEC 70 mm x 70 mm x 2.0 mm	70	70	2,0	4,19	5,34	40,73	11,64	13,52	63,89
PTEC 70 mm x 70 mm x 2.5 mm	70	70	2,5	5,17	6,59	49,42	14,12	16,54	78,35
PTEC 70 mm x 70 mm x 3.0 mm	70	70	3,0	6,13	7,81	57,55	16,44	19,42	92,19



CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

Tabla 4 Perfil tubular estructural de CORPACERO.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta estructura debe ser firme y la tubería debe ser unida con soldadura por arco eléctrico o soldadura MIG (soldadura con gas inerte de metal), ya que soportará el peso del motor, la batería, el cargador de la batería, la caja multiplicadora y el generador-arrancador que se esté probando en ese momento, adicionalmente debe disipar las vibraciones que genere el motor y la caja multiplicadora cuando estén girando a máxima RPM.

La pintura de toda la estructura debe brindar protección contra la corrosión, por eso se debe dar una primera capa de pintura anticorrosiva y luego agregar otras dos capas de esmalte color gris industrial. En la Tabla 5 se muestran las características de las pinturas a utilizar.

Referencia	Descripción	Fabricante	Número de capas	Tiempo de secado
507 mate gris	Anticorrosiva	Pintuco	2	6-8 horas @25°C
Pintulux	Esmalte gris	Pintuco	2	24 horas @40°C

Tabla 5. Características de las pinturas.

8.2.1.2 Estructura de soporte para el motor y la caja multiplicadora: Estos soportes son los encargados de mantener fijos y alineados al motor y la caja multiplicadora. Estos soportes están acoplados a la estructura de tubo cuadrado por medio de cauchos amortiguadores con el fin de absorber las vibraciones que se puedan generar debido a la alta velocidad de giro del motor y la caja multiplicadora.

Los cauchos amortiguadores para el motor se seleccionaron del catálogo de productos de Cauchos Malaca, con referencia 1117 y los soportes con referencia 1119 se seleccionaron para soportar la caja multiplicadora.

8.2.1.3 Soporte para el generador-arrancador: Este es el encargado de sujetar y mantener centrado el generador-arrancador con respecto al eje al cual va acoplado para hacerlo girar. Será fabricado en aleación de aluminio 7075, es un aluminio fácil de mecanizar y de buenas propiedades mecánicas. En la Tabla 6, la empresa Alu-Stock nos provee las características técnicas de algunas de sus aleaciones de aluminio más comerciales.



E : modulo de Young; G: modulo de rigidez; V: coeficiente de Poisson; Cp: calor específico; α : coeficiente de expansión térmica; ρ : densidad; λ : conductividad térmica; CE: conductividad eléctrica.

Tabla de propiedades físicas de las principales aleaciones de aluminio:

Aleación	Estado	E (MPa)	G (MPa)	V	Intervalo de fusión (C°)	C _p	α $\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$	ρ kg m^{-3}	ρ_{el} $\text{n}\Omega \text{m}$	λ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	CE %IACS
1050	Todos	69.000	25.900	0,33	645 - 658	899	23,5	2.700	29,0	229	59,5
6082	T6	70.000	26.400	0,33	575 - 650	894	23,1	2.710	39,0	172	44,0
6106	T5	69.500	26.100	0,33	610 - 655	897	23,4	2.700	35,0	192	49,5
7010	T7	72.000	27.100	0,33	475 - 630	857	23,7	2.820	43,0	153	40,0
7020	T5 / T6	70.000	26.400	0,33	605 - 645	873	23,3	2.780	49,0	139	35,0
7075	O	72.000	27.100	0,33	475 - 635	862	23,5	2.810	38,0	175	45,5

Tabla 6 Propiedades físicas de algunas aleaciones de aluminio.

La pieza será diseñada con software de diseño mecánico, el cual facilite su posterior procesamiento para el mecanizado de la pieza en una fresadora de control numérico (CNC).

8.2.2 Sistema generador de giro.

8.2.2.1 Conexión de alimentación eléctrica: Según lo establecido en la sección 402 CONDUCTORES PARA APARATOS y sus artículos 402-3 Tipos, 402-5 Capacidad nominal de los conductores para aparatos y la tabla 402-3 Conductores para aparatos, de la norma NC-2050 (Norma Técnica Colombiana), la selección del conector, el cable de alimentación y el dispositivo de protección para el banco de pruebas no debe ser menor a 15 amperios y el cable debe tener una sección transversal no menor a 2.08mm^2 por hilo conductor como lo muestra la Tabla 7 a continuación.

Sección transversal		Capacidad de corriente (A)
mm^2	AWG	
0,82	18	6
1,31	16	8
2,08	14	17
3,30	12	23
5,25	10	28

Tabla 7 Capacidad de corriente de los conductores para aparatos (tomado de la tabla 402-3 de la norma NTC-2050).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

8.2.2.2 Sistema de protección y desconexión del equipo: La capacidad de corriente del cargador de baterías, debe ser mínimo de 10 amperios, con esta capacidad se asegura una carga completa de la batería.

Ya que las regulaciones colombianas NTC-2050, en el artículo 511-8 “equipos para carga de baterías” no permiten instalar el cargador de batería dentro del banco, puesto que estaría dentro de la clasificación I “lugares con vapores combustibles”, la instalación del cargador de la batería se realizará detrás del panel de instrumentos de medida y el cableado de conexión a la batería debe garantizar que su uso está certificado para lugares clase I.

Como medida de protección contra cortocircuito, el cable que suministra la corriente a la batería debe tener instalado un interruptor automático (circuit breaker) de 15 amperios, con esta capacidad se asegura que en caso de cortocircuito se interrumpa el suministro de corriente a la batería.

En caso de alguna falla en el banco de pruebas o de algún cortocircuito durante la prueba, se contará con un botón de parada de emergencia, el cual cortará el suministro eléctrico al banco de pruebas y hará que el motor se detenga para que el generador-arrancador no siga girando.

8.2.2.3 Control de velocidad mecánico: Para realizar el control de las revoluciones del motor se instalará un sistema de actuación por guaya utilizado en el control de aceleración de los motores recíprocos de aviones pequeños como la mostrada en la Figura 4. Este sistema consta de una perilla circular, una guaya que corre dentro de una chuspa metálica flexible y un cuerpo roscado adyacente a la perilla para su anclaje en la estructura. Es ideal utilizar este sistema puesto que, por su construcción permite hacer ajustes de recorrido muy mínimos haciendo rotar la perilla y permite hacer ajustes de recorridos grandes presionando el botón del centro de la perilla y empujando o halando la perilla para hacer los cambios de aceleración.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 4 Guaya para control de aceleración usada en aviación (tomada de Aircraft Spruce & Specialty Co.).

8.2.2.4 Motor de combustión interna: Llamado también motor de ciclo de Otto o motor a pistón, es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica a partir de energía química de un combustible que se hace explotar dentro de la cámara de combustión (cilindro-pistón). Casi todos los automóviles de hoy utilizan este motor y por lo general de cuatro tiempos para convertir la energía química (gasolina) a movimiento. El ciclo de cuatro tiempos también es conocido como ciclo de Otto, en honor a Nikolaus Otto. Estos son:

1. Admisión: El pistón baja en el momento en que la válvula de admisión se abre, permitiendo el ingreso de la mezcla aire/gasolina.
2. Compresión: El pistón sube comprimiendo la mezcla aire/gasolina, las dos válvulas están cerradas.
3. Explosión: El pistón llega al máximo de su recorrido TDC (Punto Muerto Superior), la bujía entrega la chispa, se produce la explosión y el pistón es impulsado hacia abajo.
4. Escape: El pistón sube nuevamente, pero esta vez la válvula de escape se encuentra abierta permitiendo la salida de los gases quemados.

Estos motores producen bastante vibración debido al movimiento alternativo de los pistones, pero se obtiene bastante potencia con motores pequeños. En la Figura 5 se observa los cuatro tiempos mencionados anteriormente y se señalan los componentes básicos de un motor de combustión interna de cuatro tiempos.

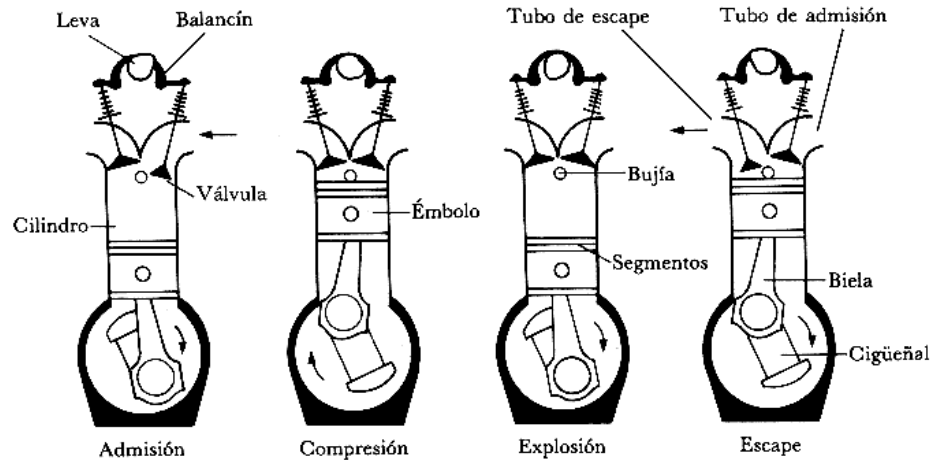


Figura 5 Motor de combustión interna y sus partes. (Tomado de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>)

El motor seleccionado para el banco de pruebas, es una máquina que se usa para darle potencia al automóvil Tico de la marca Daewoo. Este motor cuenta con tres pistones en configuración lineal con una cilindrada de 800cc (centímetros cúbicos), una potencia de 48 caballos de fuerza y un par máximo de 64Nm a 3000 RPM. A continuación se muestra en la Tabla 8 los datos técnicos del motor.

Datos técnicos

Marca	Daewoo	
Modelo	Tico	
Motor	0.8 (48 Hp)	
Potencia máxima	48 CV /5000rpm.	
Cilindrada -real-	796 cm ³	
Par máximo	64 Nm /3000rpm.	
Sistema de combustible	carburador	
Número Cilindros	3	48 CV
Diámetro del cilindro	68.5 mm.	
Recorrido del cilindro	72 mm.	
Ratio de compresión	9	
Número de válvulas por cilindro	2	796 cm ³
Combustible	Gasolina	

Tabla 8 Datos técnicos del motor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La caja de engranajes multiplicadora tiene una relación de transmisión de 1:3,5 lo que quiere decir que si en el eje de entrada da una vuelta, el eje de salida da 3,5 vueltas. Con esta relación de transmisión se asegura el aumento de RPM de 3700 a 12950 máximo las cuales necesita el generador para dar su máximo de amperaje.

Analizando la transmisión de torque a través del sistema, se puede notar que el torque disminuye, esto debido a que la caja de engranajes funciona aumentando la velocidad de giro, es por esto que se requiere de un motor de gran potencia que impulse la transmisión. La pérdida de torque se calcula de la siguiente manera:

$$\omega_1 = 3700RPM \times \frac{2\pi Rad}{1Rev} \times \frac{1min}{60s} = 387,46rad/s$$

$$\omega_2 = 12950RPM \times \frac{2\pi Rad}{1Rev} \times \frac{1min}{60s} = 1356,12rad/s$$

$$Relación\ de\ transmisión = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{387,46\ rad/s}{1356,12\ rad/s} = 0,2857$$

$$T_2 = T_1 \times \frac{\omega_1}{\omega_2} = 64Nm \times 0,2857 = 18,28Nm$$

En la salida de la caja de engranajes multiplicadora se contaría con un par mínimo de 18,28Nm, puesto que estos cálculos con realizados sin tener en cuenta muchas pérdidas de potencia del sistema.

8.2.2.5 Conexión del motor con la caja de engranajes multiplicadora: Para conectar el motor de combustión interna con la caja de engranajes multiplicadora se utilizará una transmisión por bandas y poleas, de esta manera se minimiza el ruido producido por el sistema. Este sistema tiene una eficiencia del 95% debido a las perdidas por deslizamiento de la banda en la polea. A continuación se muestran los cálculos de las poleas y la selección de la banda.

$$velocidad\ del\ eje\ impulsor = 3700rpm$$

$$velocidad\ del\ eje\ impulsado = 3700rpm$$

$$potencia\ nominal = 40hp$$

$$factor\ de\ servicio = 1.2 \quad motor\ de\ combustion\ impulsando\ un\ generador$$

$$potencia\ de\ diseño = 1,2 \times 40hp = 48hp$$

La selección del tipo de banda se realiza en base a las rpm del eje más rápido y a la potencia de diseño. Intermecc ofrece en su catálogo una gráfica para la selección de la banda, la cual se muestra a continuación:

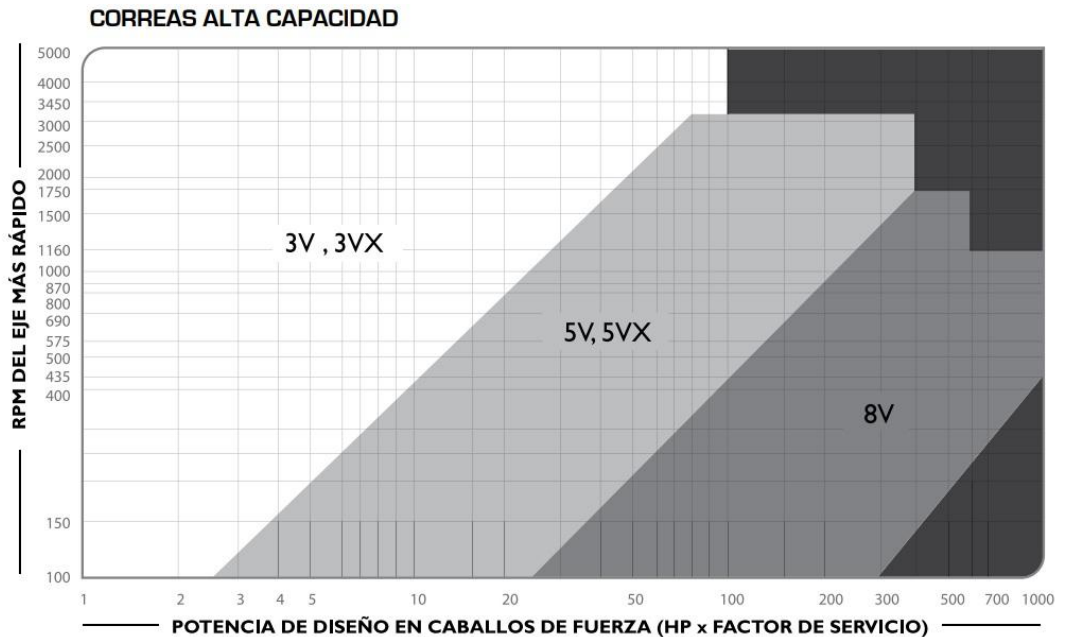


Figura 6 Gráfica para selección de tipo de banda (tomada del catálogo de poleas en “v” de Intermecc).

Teniendo en cuenta los datos escritos anteriormente, el tipo de banda a usar sería la 3V o 3VX. Habiendo determinado el tipo de banda se procede a determinar la relación de transmisión, los diámetros de las poleas, la longitud de banda y el número de bandas a usar.

$$\begin{aligned} \text{relación de transmisión} &= \frac{\text{velocidad del eje impulsor}}{\text{velocidad del eje impulsado}} \\ &= \frac{3700\text{rpm}}{3700\text{rpm}} = 1 \end{aligned}$$

$$D_1 = \frac{12 \times \text{Vel. banda}}{\pi \times \text{rpm motor}} = \frac{12 \times 4000 \text{ ft}/\text{min}}{\pi \times 3700\text{rpm}} = 4,12''$$

$$D_2 = D_1 \times \text{relación de transmisión} = 4,12 \times 1 = 4,12$$

diámetro tentativo de poleas = 4,5"

$$\begin{aligned} \text{distancia entre centros tentativa} &= D_1 < C < 3(D_1 + D_2) \\ &= 4,5 < C < 27 \end{aligned}$$

$$\text{longitud de banda} = 2C + 1,57(D_1 + D_2) + \frac{(D_1 - D_2)^2}{4C}$$

$$\text{longitud de banda} = 2(25'') + 1,57(4,5'' + 4,5'') + \frac{(4,5'' - 4,5'')^2}{4(25'')}$$

$$\text{longitud de banda} = 64,13''$$

La longitud estándar seleccionada es de 63'' y con esta medida se calcula la distancia entre centros real.

$$B = 4L - 6,28(D_1 + D_2) = 4(63'') - 6,28(4,5'' + 4,5'') = 195,48''$$

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(D_2 - D_1)^2}}{16}$$

$$C = \frac{195,48'' + \sqrt{(195,48'')^2 - 32(4,5'' - 4,5'')^2}}{16} = 24,43''$$

Calculo de número de bandas y potencia por banda según ##### de Intermecc:

$$\text{número de bandas} = \frac{\text{potencia de diseño}}{\text{potencia corregida}} = \frac{48\text{hp}}{9,9\text{hp}} = 4,84 \approx 5 \text{ bandas}$$

TABLA DE CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN POR CANAL (EN HP)										CORREAS TIPO 3VX
Diámetro exterior de la Polea Motriz [en milímetros]										
115	120	125	135	140	150	165	175	200	270	
6.63	7.14	7.65	8.25	8.84	9.60	10.56	11.30	13.24	17.30	2300
6.88	7.40	7.92	8.54	9.15	9.95	10.92	11.68	13.68	17.80	2400
7.12	7.66	8.20	8.83	9.46	10.28	11.28	12.06	14.10	18.23	2500
7.35	7.90	8.47	9.12	9.77	10.60	11.63	12.43	14.50	18.65	2600
7.58	8.16	8.73	9.40	10.07	10.93	11.98	12.80	14.90	19.04	2700
7.80	8.40	9.00	9.68	10.36	11.24	12.30	13.14	15.27	19.40	2800
7.92	8.53	9.12	9.82	10.50	11.40	12.48	13.30	15.46	19.56	2850
8.04	8.65	9.25	9.95	10.65	11.55	12.64	13.48	15.64	19.72	2900
8.26	8.88	9.50	10.22	10.93	11.85	12.96	13.80	15.98	20.00	3000
8.70	9.34	10.00	10.74	11.47	12.43	13.57	14.44	16.63	20.48	3200
9.10	9.79	10.46	11.24	12.00	12.97	14.14	15.02	17.22	20.80	3400
9.20	9.90	10.57	11.36	12.12	13.10	14.28	15.16	17.35	20.86	3450
9.36	10.22	10.90	11.70	12.50	13.50	14.67	15.56	17.73	20.98	3600
9.90	10.63	11.34	12.16	12.96	13.97	15.17	16.05	18.17	—	3800
10.00	11.03	11.75	12.60	13.40	14.42	15.62	16.50	18.54	—	4000
10.64	11.40	12.14	13.00	13.80	14.84	16.02	16.90	18.82	—	4200
10.98	11.76	12.50	13.37	14.20	15.22	16.40	17.22	19.03	—	4400
11.30	12.10	12.85	13.72	14.54	15.56	16.70	17.50	19.15	—	4600
11.60	12.40	13.18	14.05	14.86	15.86	16.97	17.72	19.18	—	4800
11.90	12.70	13.47	14.34	15.15	16.13	17.18	17.90	—	—	5000

Tabla 9 Potencia por banda (tomada del catálogo de poleas en "v" de Intermecc).

Las poleas seleccionadas son PQ5-3V120 fabricada por Intermecc, son poleas de 5 canales con un diámetro de 120mm en fundición de acero 1020.

8.2.2.6 Caja de engranajes multiplicadora: Este mecanismo consta de dos ejes paralelos en los cuales se instalan ruedas dentadas llamados engranajes, estos sirven para transmitir movimiento circular mediante el contacto de los engranajes. Dependiendo de su diseño la velocidad de giro del eje de entrada puede ser reducida, como en el caso de las

cajas reductoras o aumentar la velocidad de giro como es el caso de las cajas multiplicadoras.

Los engranajes de las cajas multiplicadoras pueden ser de dos tipos: engranajes rectos o helicoidales. Los primeros se utilizan en cajas multiplicadoras de ejes paralelos y presentan una relación de multiplicación máxima en cada etapa de 1:5. Los engranajes helicoidales tienen un diseño más sofisticado que los engranajes rectos y se emplean en cajas multiplicadoras de tipo planetario. La relación de multiplicación en cada etapa puede ser como máximo de 1:12. En general, las cajas multiplicadoras de ejes paralelos son más sencillas de diseñar y por lo tanto más baratas que los diseños planetarios. Los nuevos diseños de este componente incluyen parte de los apoyos del eje de baja velocidad en su propia estructura. Las ventajas que presenta este diseño es: por una parte su reducido peso y su facilidad de ensamblaje con otros elementos del tren de potencia durante el período de montaje. En la Figura 7 se muestran las partes más importantes de la construcción de un engranaje.

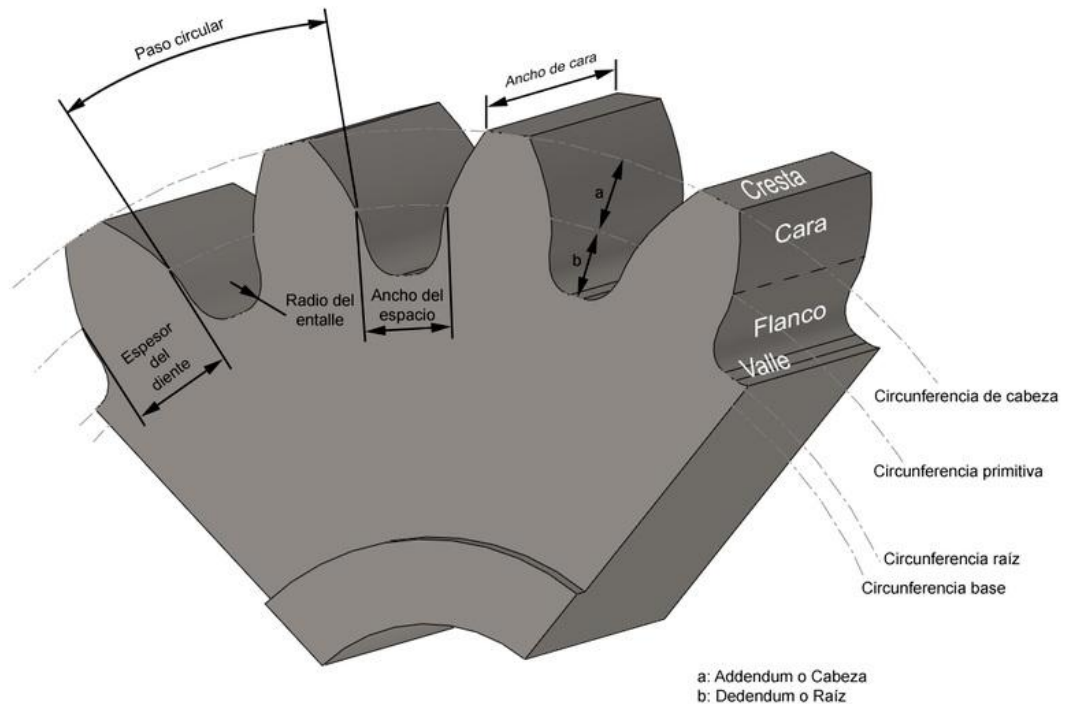


Figura 7 Elementos de un engranaje (diseño IZANTUX).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Debido a los costos tan elevados de la fabricación de una caja de engranajes, se evaluaron alternativas comerciales existentes y se seleccionó una caja multiplicadora de la empresa española Hidráulica Rogimar SA, STM serie 80000 con relación de transmisión de 3,5, una potencia de 36 HP y un peso de 13,5 Kg.

8.2.2.7 Cargador de baterías de 24Vdc: como se mencionó anteriormente, este dispositivo será el encargado de mantener la batería con el máximo de carga. Para ello se buscó comercialmente un equipo electrónico de regulación automática y fácil manipulación. La marca Suoer ofrece una solución con las características necesarias para el banco. Es un cargador de baterías de 24V a una tasa de carga de 10A, este dispositivo realiza la carga de la batería a voltaje constante, lo que es más seguro para la batería debido a que no se produce recalentamiento de las celdas por un exceso de corriente y de este modo, la batería es quien define la demanda de corriente al cargador.

8.2.2.8 Batería de 24v: El tipo de baterías más común es de plomo-acido, estas baterías están construidas por varias celdas de 2v cada una. Cada celda contiene un par de placas de plomo, una actuando como electrodo positivo y la otra como electrodo negativo y ácido sulfúrico como electrolito. Esta realiza un proceso electroquímico para acumular corriente o entregar corriente en el momento en que se conecten cargas entre sus bornes positivo y negativo. Este tipo de baterías son seguras y de muy buen rendimiento, lo cual la convierte en la mejor solución para el banco de pruebas. El fabricante de baterías para avión Concorde, fabrica la batería RG380E/44, una batería ampliamente usada en los aviones con motores turbohélice, es una batería de 24v con una capacidad de corriente de 42Ah y una corriente de arranque de 1350A@23°C, y por su diseño compacto es ideal para dar solución a el requerimiento del banco de pruebas.

8.2.2.9 Contactor para el modo arrancador: El contactor o relé es un dispositivo electromecánico que energizando la bobina con una corriente pequeña, abre o cierra unos contactos con los cuales permite el control de corrientes mucho mayores a las de excitación de la bobina. Para el control del generador-arrancador en modo arranque se usará un relé de arranque para motores diesel, estos dispositivos son lo suficientemente potentes para soportar la corriente que consume el generador-arrancador en modo arranque.

8.2.3 Sistema de medición e indicación

8.2.3.1 Indicador de RPM electrónico: Un indicador de RPM mide la cantidad de vueltas que el motor es capaz de dar en un minuto, esta medición puede ser mecánica o electrónica, siendo esta última la más utilizada hoy en día ya que el avance de la electrónica ha permitido el uso de elementos más confiables y precisos, además de poder compartir la señal con otros computadores. La empresa Ibest electrical CO LTD, fabrica un medidor de frecuencia y tacómetro, con una capacidad de lectura de 6 dígitos y puede ser programado dependiendo de la aplicación que se desee. La medición de la variable la realiza por medio de un sensor de proximidad en forma de frecuencia y luego un algoritmo calcula las RPM y las representa en la pantalla. A continuación se muestra el diagrama de conexión del sistema.

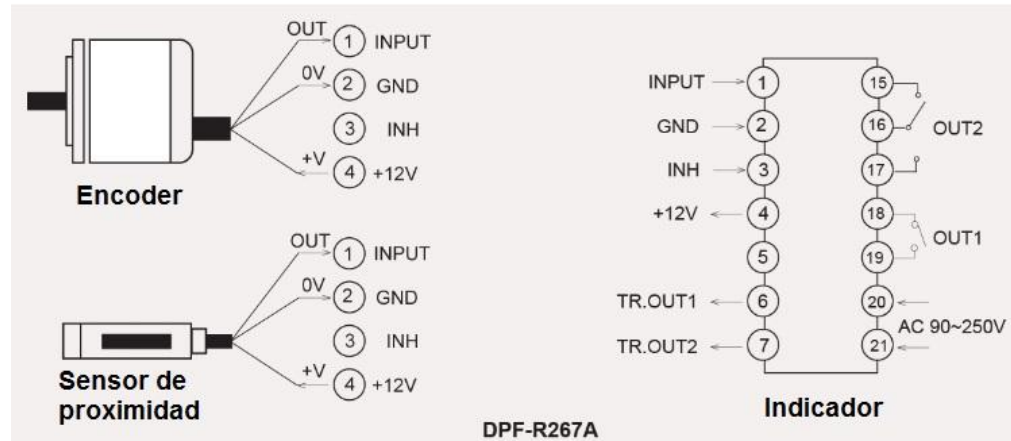


Figura 8 Conexión del sistema de indicación de RPM.

8.2.3.2 Voltímetro de 0 a 30Vdc: EL voltímetro es un aparato o dispositivo que se encarga de medir la diferencia de potencial entre dos puntos o la potencia consumida por cualquiera de las partes de un circuito. Para este banco de pruebas se usarán voltímetros de bobina móvil ya que son instrumentos de bajo consumo y con una precisión de 1,5%. Celsa ofrece una solución a lo requerido en el banco de pruebas, un voltímetro de montaje vertical y de conexión directa, el modelo PQ72n/40V DC tiene un rango de medida de 0 a 40V.

8.2.3.3 Amperímetro de 0 a 15^a y de 0 a 1000A: El galvanómetro ha sido un instrumento de amplia aplicación desde hace más de un siglo. Sin embargo, ese instrumento admite intensidades máximas bastante débiles. Para medir intensidades superiores a las que podría soportar sin destruirse, se debe agregar una resistencia de muy bajo valor

conocida como “shunt” (derivación) instalada en paralelo con el galvanómetro de modo que solo pase por este una pequeña fracción de la corriente principal. Este acoplamiento es el que dio origen al amperímetro. Los amperímetros pueden tener el shunt incorporado y realizar mediciones de corriente de baja intensidad y los amperímetros de shunt externo para realizar mediciones de corriente de mayor intensidad. El amperímetro PQ72n/25A DC fabricado por la empresa Celsa es la solución ideal para la medición de corriente de baja intensidad en el banco de pruebas, mientras que el amperímetro PQ96n/1000A/60mV y el shunt 1000A/60mV son la solución ideal para la medición de las corrientes de arranque y generación en el banco de pruebas.

8.2.3.4 Bombillos piloto de indicación: Estas luces estarán acopladas al sistema y encenderán de acuerdo a la configuración del banco de pruebas. Se usaran pilotos Led de 22mm fabricados por Electrónica Raya, bajo la norma europea IEC 60947-5-1.

8.2.4 Sistema de cargas eléctricas y control del banco

8.2.4.1 Banco de resistencias de carga: Lo que se pretende con este banco de resistencias es generarle consumos de corriente al generador-arrancador que se esté probando en el banco. Por ley de Ohm sabemos que la corriente es inversamente proporcional a la resistencia, es decir, que si la resistencia es grande, la corriente que circulará a través de esta será pequeña. De acuerdo a esto se calcularon las resistencias para que al generador-arrancador se le pudiera conectar una carga de 475 amperios, conectando 5 resistencias de diferentes valores en paralelo. Los valores de dichas resistencias se calcularon con un voltaje de 28V y se seleccionaron consumos de corriente para calcular la resistencia. Ver Tabla 10.

Voltaje	Corriente	Resistencia	Cantidad
28V	25A	1,12Ω	1
28V	50A	0,56Ω	1
28V	100A	0,28Ω	2
28V	200A	0,14Ω	1

Tabla 10 Calculo de resistencias.

Usando el software de simulación electrónica Proteus 8.0, se simuló el banco de resistencias y se tomaron medidas de las corrientes que cada resistencia consume de la fuente. Los resultados se muestran en la Figura 9.

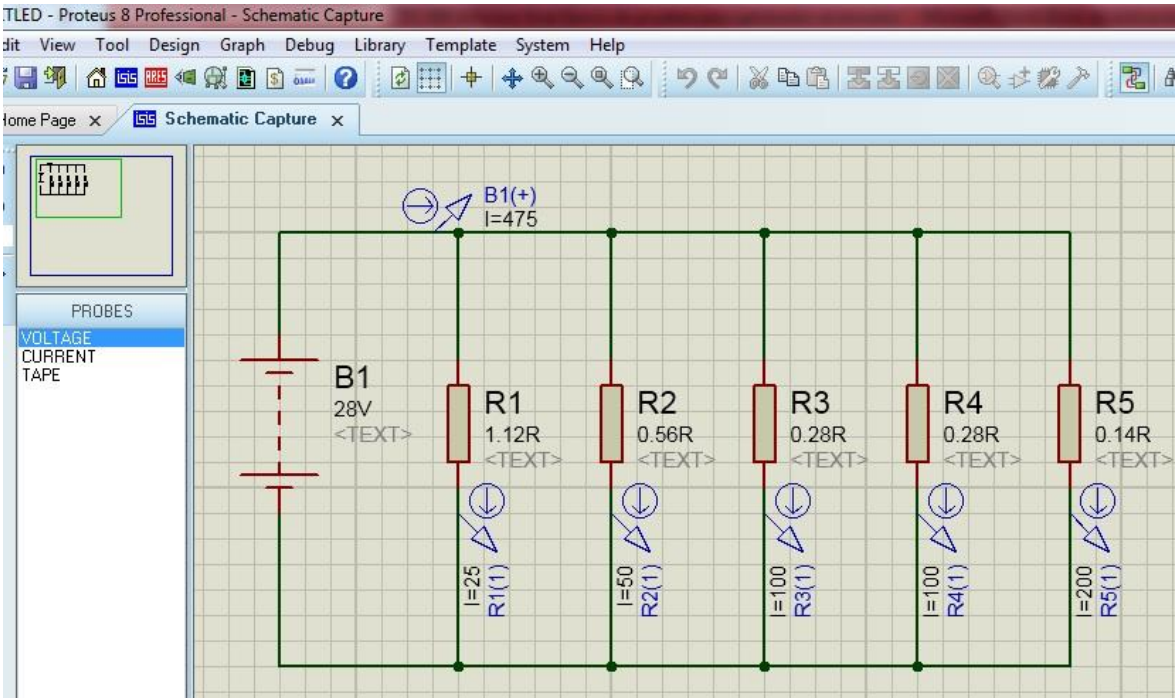


Figura 9 Simulación de las resistencias.

8.2.4.2 Contactores de selección de resistencias de carga: Para conectar las resistencias de carga con el generador sometido a prueba, se usarán relés de aviación con bobina de alta impedancia. Estos dispositivos tiene la característica de controlar grandes cargas con una pequeña excitación de la bobina. En los aviones son usados para conectar la batería con el sistema eléctrico todo el tiempo que dure el vuelo, poseen tres bornes de los cuales dos son para controlar cargas de hasta 600A y el restante es de excitación de la bobina, pero este último lo hace conectándose a la parte negativa del circuito, pues la parte positiva de la bobina está conectada internamente al borne de cargas que se encuentra conectado al lado positivo del circuito. A continuación se muestra una figura del dispositivo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



11-03161

Figura 10 Relé de batería de aviación (tomada de Aircraft Spruce & Specialty Co.).

8.2.4.3 Interruptores de selección de cargas: Como se detalló anteriormente en la descripción del banco de resistencias, estas serán actuadas por medio de relé y seleccionadas por medio de interruptores de codillo ON/OFF los cuales excitarán la bobina del relé para seleccionar la cantidad de carga que se demandará del generador, de este modo el operador del banco podrá seleccionar incrementos de carga de 25A hasta llegar a los 475A de carga máxima para el generador. Estos interruptores son de uso industrial y pueden ser conseguidos en cualquier tienda de electrónica, cuentan con un polo y una capacidad de corriente de 15A.

8.2.4.4 Interruptores de control y selección de funciones: Para energizar todo el banco de pruebas y seleccionar las resistencias de carga se usaran interruptores de codillo de un polo asociados a su respectivo circuito. Para dar arranque al motor de combustión y para hacer la prueba del componente en modo arrancador se usarán interruptores pulsadores normalmente abiertos. Para evitar que el generador-arrancado sea energizado en los dos modos al mismo tiempo, se usarán dos relés normalmente cerrados como parte del circuito de control y protección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

9. CONCLUSIONES.

- Se logró el diseño del banco para realizar pruebas a los generadores-arrancadores usados en motores turbohélice, usando un motor de combustión interna y una caja de engranajes multiplicadora, dando solución al requerimiento de altas RPM para que el generador-arrancador pueda ser probado y sus lecturas puedan ayudar a determinar el estado de este componente.
- Se identificó que el principio de funcionamiento de los generadores-arrancadores se basa en el fenómeno de inducción electromagnética (ley de Faraday), que al hacer rotar las espiras del inducido dentro del campo magnético generado en el estator, en la espira se induce una fuerza electromotriz capaz de producir una corriente eléctrica.
- Elaborando la lista de requerimientos mecánicos y eléctricos del banco de pruebas, se facilitó el dimensionamiento del banco y se pudieron identificar los elementos comerciales que formarían parte de la solución.
- La división de la máquina por sistemas, resultó ser un método muy eficiente para definir y seleccionar los diferentes componentes que formarán parte en el diseño y en una eventual construcción de este banco de pruebas.
- El uso de software de diseño mecánico facilita el modelado del sistema y facilita el acondicionamiento de los diferentes elementos que dan solución al banco de pruebas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

10.RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- El sistema de transmisión que une el motor con la caja de engranajes multiplicadora, que en este diseño se usan polea y bandas, puede ser cambiada por una transmisión por cadena y de este modo eliminar las pérdidas por deslizamiento en las bandas.
- Debido a los altos torques generados en los ejes de la caja de engranajes y a las fuerzas generadas en los dientes de los engranajes, se recomienda como trabajo futuro el diseño de una nueva caja multiplicadora con un factor de seguridad muy alto para poder asegurar un uso más continuo del banco de pruebas.

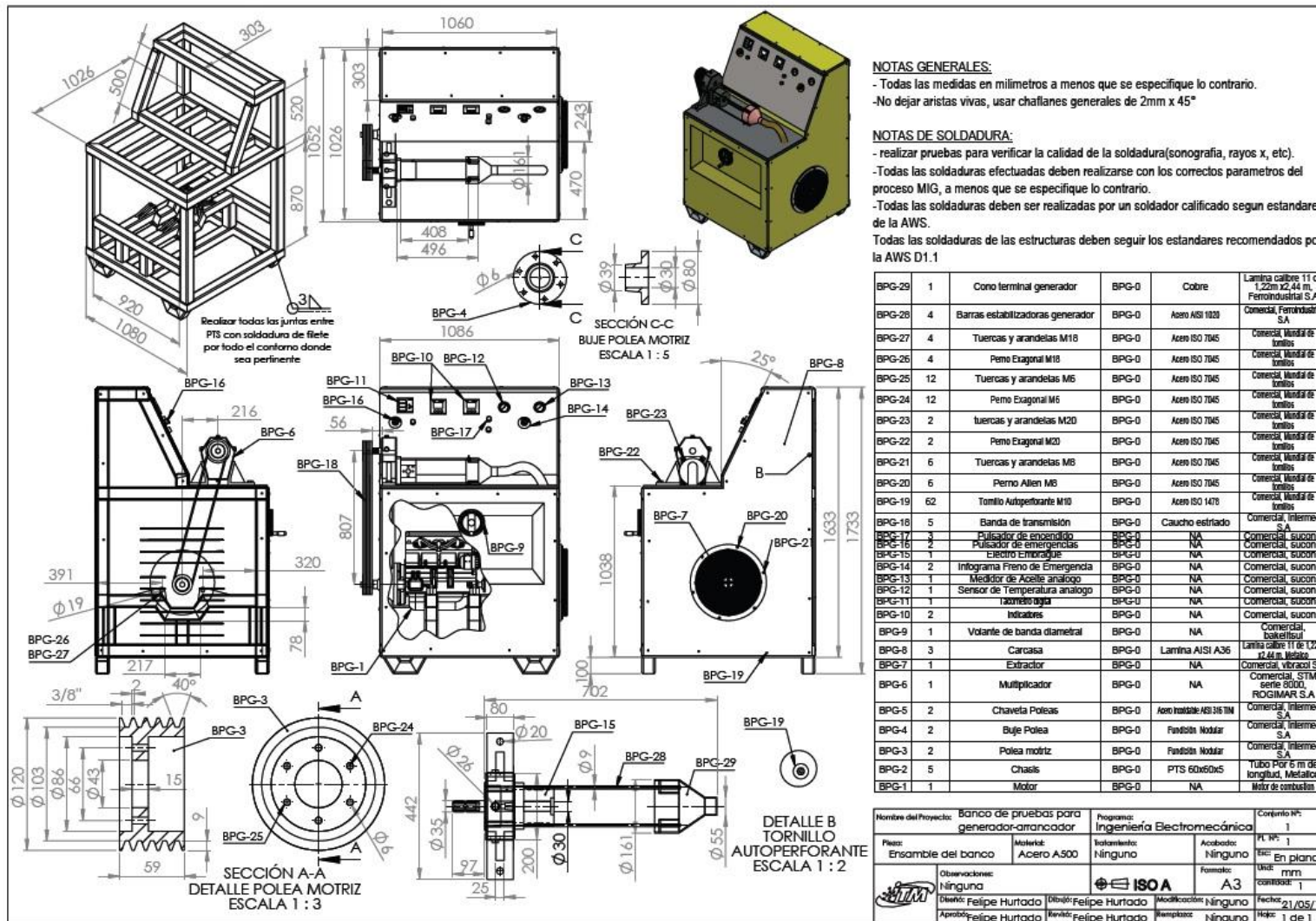
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

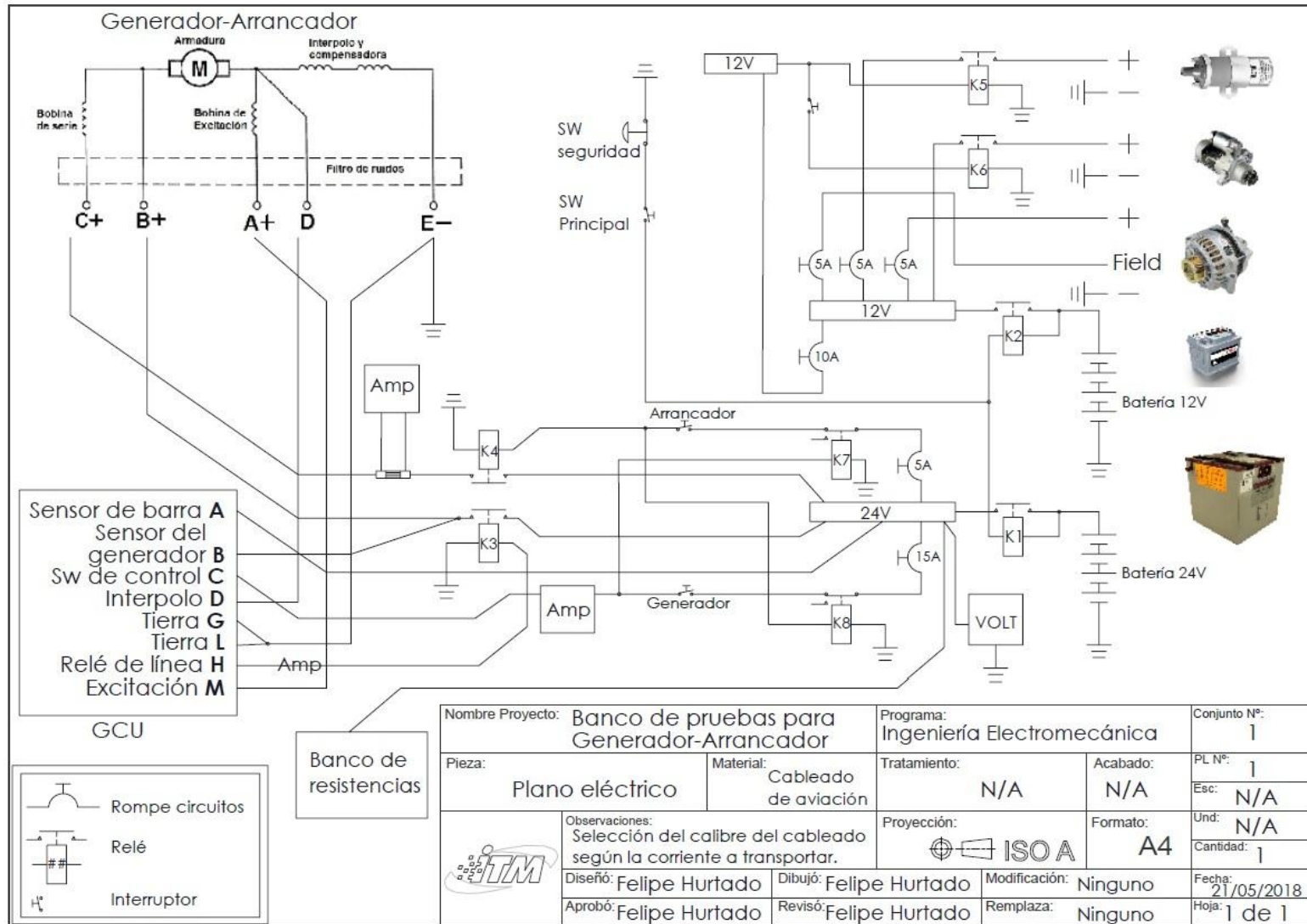
-
- A. Eida, M. A.-S.-K.-M. (2008). Active power filters for harmonic cancellation in conventional and advanced aircraft electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 80-88.
- A. Eida, M. A.-S.-K.-M. (2008). Simulation and transient analysis of conventional and advanced aircraft electric power systems with harmonics mitigation. *Electric Power Systems Research*, 660-668.
- Corporation., G. (2003). *Component maintenance manual with illustrated part list DC starter-generator 23079 series*. Aurora, OH.: Goodrich corporation.
- Crane, D. (1999). *Aircraft Instrument System, Aviaion Maintenance Technician series: Airframe* (Vol. 2). Newcastle, washington USA: Aviation Supplies & Academics (ASA).
- García, Á. F. (05 de 05 de 2008). *Física con ordenador*. Recuperado el 04 de 09 de 2017, de Curso Interactivo de Física en Internet:
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/inducccion/generador/generador.htm>
- Kosow, I. L. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Naucalpan de Juárez, Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Lear Siegler INC. (30 de Agosto de 1986). *Overhaul manual with illustrated parts list, DC GCU*. Maple Heights, Ohio, USA.
- Lucas Aerospace. (14 de Julio de 2000). *DC generators and starter-generators*. Aurora, Ohio, USA.
- Song Shoujuna, L. W. (2009). Detailed Design of a High Speed Switched Reluctance Starter/Generator for More/All Electric Aircraft. *Chinese Journal of Aeronautics*, 216-226.


APÉNDICE

Apéndice A



Apéndice B



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Apéndice C



Apéndice D



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR Cedimya Tujes p. _____

FECHA ENTREGA: 7 de junio de 2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____