



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## **DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN TURBOCOMPRESOR CARGADO CON AIRE COMPRIMIDO**

Juan Camilo Fuentes Vallejo

Profesor Asesor: Jaime Loboguerrero

Bogotá, D.C., Febrero de 2006

*A Nanda,  
El motor de mi vida*

## AGRADECIMIENTOS

Hay muchas personas sin cuya afectuosa e incondicional ayuda no hubiera logrado culminar esta etapa. Quiero agradecer a mis padres, a mi hermano, y por supuesto a Juliana y a Miranda por apoyarme y darme aliento cada vez que me faltaron fuerzas.

También quiero agradecer especialmente a Ramón Ricardo Sánchez y a Susana Esperanza Torres por su incondicional ayuda y apoyo entusiasta durante todo el desarrollo de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 LA ENERGÍA DE HOY.....	2
1.2 LA ENERGÍA DE MAÑANA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	4
1.4 PRELIMINARES .....	4
1.4.1 Estudio de Viabilidad .....	5
2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	7
3. TRABAJO PREVIO.....	8
4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS .....	9
4.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO INICIAL.....	9
4.1.1 Balance de Entalpías y Masas .....	10
4.2 DISEÑO GLOBAL DEL BANCO DE PRUEBAS .....	11
4.3 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	14
4.3.1 Diseño y adecuación del montaje experimental.....	15
4.3.2 Construcción del montaje .....	16
4.4 VERIFICACIÓN DEL MONTAJE.....	21
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	22
6. BIBLIOGRAFÍA.....	23

### ANEXOS

Anexo 1 – Densidades de Energía y Costos de Energía

Anexo 2 – Cálculos Termodinámicos Iniciales

Anexo 3 – Plano de Detalle de Construcción del Tanque de Aire Comprimido

Anexo 4 – Reporte de Verificación de Sensores de Temperatura

Anexo 5 – Reporte de Verificación de Tarjeta de Adquisición de Datos Labjack U-12

## 1. INTRODUCCIÓN

Ante la actual situación energética mundial, es cada vez más necesario buscar nuevas fuentes de energía así como medios de almacenamiento y conversión de ésta. Es aun más importante en países en desarrollo como Colombia, donde los nuevos mercados de energía afectan con mayor fuerza al pueblo. Partiendo de estudiar la viabilidad del proyecto, en este trabajo se presenta el diseño de un banco de pruebas para un turbocompresor cargado con aire comprimido. El objetivo es que el estudio con este montaje dé las bases para desarrollar un microgenerador de electricidad, que utilice la energía almacenada en reservorios de aire comprimido y equipos comerciales para hacerlo viable en un entorno de bajos presupuestos como el Colombiano.

Es necesario, desde ya, desarrollar sistemas de conversión de energía que nos permitan ingresar y subsistir en una economía que no se base en el petróleo. Dado que hay una tendencia mundial a utilizar la electricidad en toda clase de aplicaciones, incluso en sistemas de transporte masivo, suena razonable que el desarrollo de un sistema alternativo de conversión de energía se enfoque en un sistema portátil, que genere electricidad y que sea costo-eficiente. El diseño de un sistema con esas características es el objetivo del macro-proyecto en el cual se enmarca este trabajo. Al aplicar este concepto en campos como el transporte urbano, una futura adaptación a nuevas tecnologías (Ej. celdas de hidrógeno cuando estas sean aplicables al entorno Colombiano) será mucho menos traumática.

### 1.1 LA ENERGÍA DE HOY

Desde hace más de dos siglos, la humanidad ha avanzado a pasos agigantados en el desarrollo de conversión de energía partiendo de la combustión. Durante muchos años, la utilización de combustibles fósiles fue una alternativa óptima ya que era una fuente de energía relativamente económica y aparentemente inagotable, y además, no se tenían en cuenta los efectos de su combustión sobre el medio ambiente.

En este momento en la historia, nos enfrentamos a un futuro incierto en términos de energía. La creciente demanda por combustibles fósiles está llegando a los límites de oferta, y las reservas de petróleo se están agotando. Algún día, en un futuro no muy lejano, no habrá más petróleo y, ¿Qué vamos a quemar entonces?

Para Colombia, siendo un país en desarrollo, el aumento acelerado del precio de los combustibles afecta gravemente el funcionamiento de la sociedad. Esto hace que tal vez para nosotros, más que para países desarrollados, sea de vital importancia crear o adoptar nuevos métodos de conversión de energía.

Por otro lado, el impacto ambiental de la combustión de hidrocarburos es un tema cada vez más trascendental, en un momento en la historia en el que se ve como una realidad, la necesidad de generar modelos de desarrollo sostenible. Por lo pronto solo tenemos este planeta, y como vamos, pronto no dará abasto para albergarnos como pacientemente lo ha hecho hasta ahora.

## 1.2 LA ENERGÍA DE MAÑANA

Ante la preocupante perspectiva respecto a las fuentes de energía para el futuro se están adelantando desde hace varios años, grandes investigaciones en fuentes alternativas de energía y métodos alternativos de conversión, para tener una mayor eficiencia que permita una sostenibilidad de la tecnología a largo plazo.

Los motores de combustión de hidrocarburos fósiles no serán sostenibles en un futuro a mediano plazo por dos razones principales: El combustible no durará para siempre, y si lo hiciera, nos acabarían a nosotros los usuarios.

En el campo del transporte se han estado desarrollado modelos de automóviles y buses a base de energías o combustibles alternativos<sup>1</sup>. Los avances más representativos hasta el momento han sido los automóviles que funcionan a base de gas natural, con mezclas de combustibles como gasolina-etanol o híbridos entre combustión y electricidad (aunque ninguno resuelve realmente los problemas asociados con la combustión de hidrocarburos, su impacto es menor ya que son sistemas bastante más eficientes). También están los automóviles con motores de combustión interna a base de hidrógeno, que tienen gran eficiencia y no generan daño al medio ambiente (salvo que el hidrógeno para alimentarlos se obtenga a partir de hidrocarburos) o los autos eléctricos, que resultan muy eficientes pero aún tienen problemas relacionados con las baterías para almacenar la electricidad. Buscando solucionar el problema del almacenamiento de electricidad, se ha dado gran importancia a las llamadas celdas de combustible, entre las cuales las celdas de hidrógeno son las más limpias y eficientes, pero sus costos las alejan mucho del mercado.

La tendencia que más se está siguiendo a nivel mundial en términos de investigación y desarrollo es la llamada “economía del hidrógeno”. El hidrógeno, de los elementos que conocemos, es el que más energía almacena por unidad de masa (hasta aproximadamente 3 veces más que la gasolina). Por esta razón se han concentrado grandes investigaciones, esfuerzos y presupuestos en su desarrollo como una fuente de energía. Además, es el elemento ideal en términos ecológicos ya que al quemarlo se produce tan solo agua como residuo.

Los mayores avances en la investigación del hidrógeno se han dado en el tema de las celdas de combustible. Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno tiene una gran cantidad de energía por unidad de masa, sin embargo, es muy difícil de comprimir y su densidad de energía por unidad de volumen es muy baja.

Otras fuentes limpias de energía son la energía solar o la eólica, sin embargo su aplicación eficiente es muy difícil a nivel de sistemas portátiles.

En la tecnología actual se está tendiendo a utilizar la electricidad como un medio eficiente para producir trabajo mecánico, además de alimentar la gran cantidad de equipos y aplicaciones que son explícitamente eléctricas y/o electrónicas. La mayor pregunta es cómo generar y almacenar esa electricidad de manera eficiente en sistemas pequeños y no sólo en grandes sistemas como centrales hidroeléctricas, granjas eólicas o desiertos cubiertos con paneles solares.

---

<sup>1</sup> AFV por sus siglas en inglés (Alternate Fuel Vehicles).

### **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En vista de que un país como Colombia se puede ver fuertemente afectado a corto o mediano plazo por el alza en el precio de los combustibles y/o su escasez, es necesario desde ya, desarrollar métodos de conversión de energía que nos permitan ingresar y subsistir en una economía que no se base en el petróleo.

Dado que la tendencia mundial está enfocada a utilizar la electricidad como la energía que genere el movimiento en el futuro, suena razonable que el desarrollo de un sistema alternativo de conversión de energía se enfoque en un sistema que genere electricidad.

Los sistemas complementarios de los automóviles eléctricos están muy bien desarrollados, e incorporan medidas como la generación de electricidad en el frenado o la utilización del motor a manera de generador en momentos en los que no trabaja, como en las bajadas. El problema principal sigue siendo como almacenar la electricidad en un medio que no sea tan voluminoso ni pesado como las baterías que existen hoy en día, o cómo generarla localmente con equipos que garanticen la eficiencia y el impacto ambiental controlado que se requiere.

Los sistemas de mayor tecnología que se están desarrollando en el mundo (con grandes presupuestos) implican costos altísimos de desarrollo e implementación. Por esta razón, un método de conversión como las celdas de hidrógeno aún no es viable para el entorno Colombiano.

En un campo como el automotriz, cuando tecnologías como las celdas de hidrógeno sean aplicables al entorno nacional, solo será necesario cambiar el generador de electricidad y el resto del sistema se mantendrá prácticamente igual, lo que permitirá una adaptación no traumática a las tecnologías que gobernarán el transporte en el futuro.

### **1.4 PRELIMINARES**

Ante la magnitud del macro-proyecto que se propone (el diseño de un microgenerador con base en un turbo-compresor comercial), es necesario aclarar los fundamentos sobre los cuales este se apoya y que son a su vez los que justifican el proyecto.

La gran base de todo este proyecto es la energía. Particularmente, la forma de almacenarla y transportarla. En cuanto a esto, es importante diferenciar entre fuentes de energía y sistemas de almacenamiento.

Una fuente es un recurso primario del cual se obtiene una energía potencial (presión, temperatura, velocidad de fluido, potencial químico, etc.) que se puede transformar para su consumo. Un medio de almacenamiento es aquel que no tiene un potencial de energía por sí mismo sino que se debe cargar para luego utilizar esa carga de energía.

Entre las fuentes comunes de energía que usamos están los combustibles fósiles, fuentes geotérmicas, energía solar, viento, cauces de agua, etc. Almacenamientos comunes son las baterías, volantes, reservorios térmicos, aire comprimido, etc.

Teniendo en cuenta que el aire comprimido es un medio de almacenamiento de energía y no una fuente, se debe estudiar si es un buen medio de almacenamiento. Frente a otros medios y fuentes de energía, como los derivados del petróleo, el aire comprimido puede llegar a ser un buen medio ya que su densidad de energía por peso es comparable con otros almacenamientos comunes, es seguro, no produce emisiones nocivas, es de fácil

disponibilidad y recuperabilidad, y los tanques en los que se almacena presentan un comportamiento favorable, pues en comparación con las baterías, estos no se descargan con el tiempo, no tienen “efecto memoria” y no pierden su capacidad de almacenamiento con el tiempo y uso.

Una gran ventaja del aire comprimido es que va de la mano de una filosofía de conservación del medio ambiente y de la utilización racional de la energía. En este último aspecto vemos como se pueden utilizar sistemas de menos potencia para suplir necesidades para las cuales utilizamos sistemas sobredimensionados. Es cierto que es agradable manejar un auto que acelere de 0 a 100 kph en menos de 10 segundos, pero en el congestionado tráfico urbano, ¿Qué tan necesario es conducir un automóvil que logre esto, a costa de tener un gran motor que contamina mucho más de lo necesario? Por otra parte, el aire comprimido y sus aplicaciones pueden ser alternativas interesantes en procesos donde no se desea un motor que genere mucho calor o donde la combustión no se puede permitir como en sitios donde se manejan explosivos.

#### **1.4.1 Estudio de Viabilidad**

Teniendo un panorama del aire comprimido como un medio de almacenamiento de energía, se debe estudiar la viabilidad del proyecto de fabricar un generador eléctrico a base de éste.

El estudio de viabilidad cubre tres aspectos: técnico, operativo y económico.

##### **1.4.1.1 Viabilidad Técnica**

En cuanto a viabilidad técnica se tienen los siguientes argumentos:

- La presión en un fluido se puede entender como energía por unidad de volumen, y la diferencia de presión en un proceso es energía entregable.
- El aire comprimido puede almacenar energía de manera comparable con otros tipos de almacenamiento como baterías o volantes.
- Existen alternativas favorables para la compresión del aire (Ej. electricidad de bajo costo de producción y mareas).
- Al expandirse el aire se enfría y absorbe calor del entorno, en vez de liberar calor a éste, por lo cual no hay pérdidas por temperatura.

##### **1.4.1.2 Viabilidad Operativa**

Para la viabilidad operativa se tiene que:

- El sistema es una unidad sellada de bajo mantenimiento.
- Hay bajas pérdidas en el sistema.
- Operación constante en el punto de mejor eficiencia.
- Mantenimiento económico.
- Bajo consumo de lubricantes.
- No hay sistema de refrigeración (radiador, bomba, mangueras, etc.).



- No requiere filtrado especial de combustible (sólo un filtro de aire).
- Se puede utilizar en sistemas de gran generación de energía (CAES<sup>2</sup>), aplicaciones de consumo masivo como automóviles o en sistemas de aplicación específica como plantas de explosivos (donde los motores de combustión interna no son permitidos).
- Para algunas aplicaciones puede reemplazarse el proceso de generación eléctrica por un acople mecánico directo a través de una reducción, aunque es posible que se sacrifique la potencial ventaja de operar siempre en el punto de mejor eficiencia.

#### 1.4.1.3 Viabilidad Económica

- El costo de producción de generadores para utilizar aire comprimido puede llegar al rango del costo de motores a base de combustibles con prestaciones similares.
- El costo del aire comprimido como almacenamiento de energía puede llegar a ser competitivo con otros métodos de almacenamiento.
- En algunos casos (cercano a fuentes naturales para comprimir el aire, como mareas pronunciadas) el costo puede igualar el de algunos combustibles.

#### 1.4.1.4 Viabilidad del Proyecto

Con base en los puntos anteriores se concluye que el proyecto es viable pues en los tres campos de análisis muestra que es realizable y puede traer beneficios<sup>3</sup>.

Las fortalezas del proyecto están en las áreas técnica y operativa. Económicamente es un proyecto viable pero en esta fase de investigación y desarrollo, este aspecto no es el más fuerte.

---

<sup>2</sup> “Compressed Air Energy Storage” – Almacenamiento de Energía en Aire Comprimido

<sup>3</sup> Ver en el Anexo 1 una comparación de diferentes densidades y costos de energía

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El trabajo se enmarca dentro del macro-proyecto de diseñar un sistema portátil de generación de electricidad, que funcione a base de aire comprimido, utilizando un turbocompresor comercial y logrando un costo competitivo con otros sistemas de generación similares. Dentro de este marco, el objetivo general del proyecto es crear la base para una sólida etapa de investigación y desarrollo previa al diseño comercial.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Sustentar el macro-proyecto con un estudio de viabilidad
- Diseñar y construir un banco de pruebas para el sistema propuesto
- Desarrollar una metodología de pruebas para utilizar el banco de pruebas

El alcance global del proyecto consta de dos partes: El estudio de viabilidad del macro-proyecto y el diseño del banco de pruebas.

En cuanto al estudio de viabilidad, el alcance consiste en verificar la viabilidad técnica de la propuesta. La viabilidad económica, que no se puede descuidar en ningún proyecto de ingeniería, se tiene en cuenta más no es central en el desarrollo del trabajo y por esto no se trabaja a fondo.

Teniendo que el proyecto es viable, se trabaja en el diseño del montaje experimental para pruebas, con el objetivo de verificar la teoría propuesta y observar el comportamiento real del sistema. Siguiendo esta línea de acción, se trabaja con un equipo comercial el cual se adapta e instrumenta para funcionar como el microgenerador propuesto.

Dentro del contexto del diseño global del microgenerador, la etapa en la que se trabaja es la de investigación y desarrollo inicial, para validar la viabilidad técnica del posible diseño de un sistema comercial. Aunque en un principio se había pensado diseñar completamente el microgenerador, se llegó a la conclusión de que el diseño completo de una turbomáquina, para que esta sea una máquina eficiente y óptima, requiere de un sustento teórico sólido, analizado, probado y verificado, además de un equipo de diseño altamente especializado para llegar a un producto competitivo.

### 3. TRABAJO PREVIO

Los motores de aire comprimido son un modelo cuyo fundamento científico no es demasiado complejo y existe una gran variedad de posibles soluciones. Por esta razón, muchas personas han trabajado sobre el tema y han llegado a muchas y distintas conclusiones y diseños.

A nivel de motores de aire comprimido para utilización en el campo de transporte, tal vez la pauta hoy en día la marca el diseño del francés Guy Nègre, quien desarrolló un motor de pistones, de aire comprimido, que además permite un funcionamiento híbrido con combustibles fósiles. La marca comercial que ha hecho de este motor un automóvil real es MDI<sup>4</sup>. El diseño de este motor se destaca por su eficiencia y versatilidad, lo que lo hace un competidor sólido en el campo de los automóviles. Además, el diseño está enfocado no solo al motor sino al automóvil completo. El modelo de calle de esta marca es un carro urbano, pequeño, liviano, con un desempeño basado en la eficiencia más que en los grandes números (aceleración, velocidad tope, caballaje, etc.) con que se comparan los autos de grandes prestaciones con motores de combustión interna de hidrocarburos. Este motor funciona mediante la compresión de aire en pistones, que luego se mezcla con aire comprimido proveniente de un tanque, y que luego se expande produciendo trabajo.

Otros motores de aire comprimido funcionan aprovechando la velocidad de flujo del aire al descomprimirse y transmitiendo esto a un eje. Algunos otros utilizan el empuje creado por el aire al pasar por una tobera.

Hasta el momento no se ha encontrado referencia de motores de aire comprimido que se utilicen para generar electricidad. En todos los casos encontrados se utiliza la energía almacenada en el aire para generar movimiento directamente.

---

<sup>4</sup> [www.theaircar.com](http://www.theaircar.com)

## 4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

El diseño del montaje para pruebas se desarrolla en dos etapas de trabajo:

- Diseño y adecuación del montaje experimental
- Construcción del montaje

Para cada etapa hay una serie de tareas puntuales descritas en el numeral 4.3. Sin embargo, antes de entrar en la descripción de los detalles, se presenta la teoría que se desea probar.

### 4.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO INICIAL

El generador propuesto es de flujo constante (compresor y turbina) y no de masa constante (ej. pistón), por lo cual para análisis del sistema se debe modelar el ciclo termodinámico con flujo constante en un volumen de control en vez de masa constante. El balance de energía se hace con las entalpías que entran y salen del volumen de control.

El esquema del ciclo es el que se observa en la Figura 1.

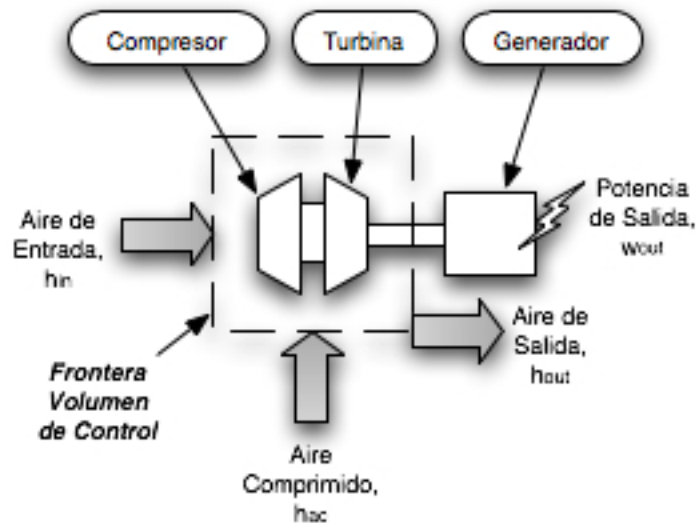


Figura 1. Esquema básico del ciclo propuesto

La secuencia básica de funcionamiento del generador es la siguiente:

- Se toma aire atmosférico y se comprime. Al comprimirse este aire se calienta.
- En una cámara intermedia se introduce aire comprimido lo cual aumenta la masa inicial de aire comprimido.

- Al salir, el aire pasa por una turbina donde, al expandirse, genera potencia que alimenta el compresor y el generador eléctrico.
- Es ideal que el aire de salida tenga la menor velocidad posible pues no interesa el empuje sino la potencia que se transmita al eje.

Con base en este sistema físico se define el ciclo, en parte basándose en lo que se esperaría que suceda y en parte observando los ciclos que siguen sistemas similares como son las turbinas de gas (teniendo en cuenta que el comportamiento es muy similar a varias escalas, como lo son turbo-compresores, microturbinas y nanoturbinas).

#### 4.1.1 Balance de Entalpías y Masas

El primer balance que se debe hacer para analizar el sistema es sumar las entalpías que entran, e igualarlas a las entalpías que salen más el trabajo que hace el generador y las pérdidas del sistema. En la ecuación 1 no se tienen en cuenta las pérdidas pues estas son una constante del sistema y siempre se pueden incluir más adelante, al momento de hacer un cálculo real.

Los datos de las entalpías para el aire a diferentes temperaturas se tomaron de las tablas termodinámicas del libro de Sonntag (ver referencias).

Teniendo las convenciones:

- $\dot{m}_{in}$  flujo másico de entrada al sistema
- $h_{in}$  flujo de entalpía de entrada al sistema
- $\dot{m}_{ac}$  flujo másico de aire comprimido
- $h_{ac}$  flujo de entalpía de aire comprimido
- $\dot{m}_{out}$  flujo másico de salida del sistema
- $h_{out}$  flujo de entalpía de salida del sistema
- $w_{out}$  voltaje de salida
- $i$  corriente de salida
- $\eta_{alt}$  eficiencia del generador/alternador
- $t_{aut}$  tiempo de autonomía del sistema
- $m_{tanque}$  masa de aire almacenada en el tanque

Se escriben las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} + \dot{m}_{ac} \cdot h_{ac} - \dot{m}_{out} \cdot h_{out} = w_{out} = v \cdot i \cdot \eta_{alt} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{in} = \frac{w_{out} - \dot{m}_{ac} \cdot (h_{ac} - h_{out})}{(h_{in} - h_{out})} \quad (2)$$

En la ecuación 2 se obtiene que el flujo de aire atmosférico que debe entrar al sistema depende de la entrada de aire comprimido y de la potencia que se desee obtener del sistema.

La autonomía del sistema depende de que tan rápido se consuma el aire comprimido en el tanque.

$$t_{aut} = \frac{m_{tan\ que}}{\dot{m}_{ac}} \quad (3)$$

De este análisis inicial se obtiene que si el aire que entra está más caliente, llevará más entalpía y por lo tanto se puede reducir su caudal. Esto se puede lograr poniendo el alternador antes del compresor, haciendo que el aire de entrada sea el que lo refrigere para así recuperar el calor que se perdería en la generación y aumentar la eficiencia del sistema.

Otro aspecto que se nota acá es que es deseable que la etapa de admisión y compresión tengan buen aislamiento térmico pues trabajarán a temperaturas superiores a la ambiente y son susceptibles de generar pérdidas. Por el contrario, es bueno que en la etapa de expansión en la turbina haya transferencia de calor pues en este caso la turbina robaría calor al medio ambiente y mejoraría el desempeño del sistema.

El último factor que se relaciona con estas variables es la velocidad del eje. Dado que la potencia es igual al voltaje por la corriente por la eficiencia del alternador, y la corriente es función del campo magnético y la velocidad, para una potencia determinada y un voltaje de salida, se requerirá una cierta corriente que dictará la velocidad de giro necesaria en el eje. Estos cálculos se pueden aterrizar con los datos del fabricante del alternador.

Se realizó un cálculo tentativo inicial del comportamiento del sistema con los siguientes datos de entrada:

- Entalpía del aire de entrada (100 kPa, 25 °C) 299 kJ/kg
- Entalpía del aire de salida (100 kPa, 25 °C) 290 kJ/kg
- Entalpía del aire comprimido (100 kPa, 25 °C) 309 kJ/kg
- Masa de entrada de aire comprimido 0.0005 kg/s

Y se obtuvo que el flujo de masa de aire atmosférico que se necesita es 0.059m<sup>3</sup>/s para una autonomía del sistema de 76 min<sup>5</sup>.

## 4.2 DISEÑO GLOBAL DEL BANCO DE PRUEBAS

Como se ilustra en la Figura 2, el banco de pruebas consta de cinco bloques principales:

- Aire Comprimido

---

<sup>5</sup> Ver ampliación de estos cálculos en el Anexo 2

- Turbocompresor
- Lubricación del Turbocompresor
- Adquisición y Procesamiento de Datos
- Integración del sistema

Los bloques de Aire Comprimido y Lubricación son entradas del bloque del Turbocompresor y éste a su vez es entrada del bloque de Sistema de Adquisición de Datos. La Integración del Sistema enmarca todo el Banco de Pruebas pues es lo que hace posible conectar los bloques entre sí.

El bloque de Aire Comprimido consta de un tanque de aire comprimido así como el bloque del turbocompresor sólo contiene a este equipo.

El bloque de lubricación comprende un tanque sumidero de aceite, bomba de aceite, aceite, acople de bomba a motor y motor.

El bloque de Adquisición y Procesamiento de Datos incluye sensores, tarjeta(s) de acopio de conexiones de sensores, tarjeta(s) de adquisición de datos con interface USB y un computador.

El bloque de integración lo componen el patín de soporte del turbocompresor y el sistema de lubricación, mangueras de aceite y racores, y tuberías, válvulas y accesorios del servicio de aire comprimido.

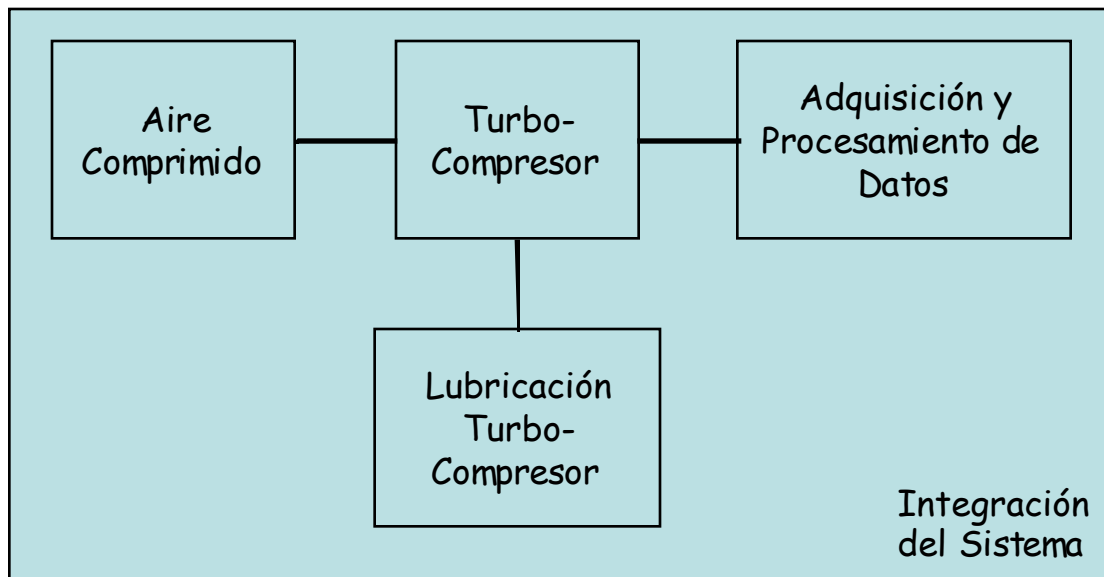


Figura 2. Bloques del Banco de Pruebas

En la Figura 3 se presenta el Diagrama de Tuberías e Instrumentos (P&ID) que es la visión global de la integración del sistema.

Los símbolos utilizados en el P&ID son los siguientes:

- TC Turbocompresor
- TK Tanque de aire comprimido
- VA Válvula
- CR Caja reductora
- TQ Sistema de medición de torque al freno
- WT Medidor de rpm
- PI Tubo de Pitot
- PD Sensor de presión diferencial
- TP Sensor/transmisor de presión
- TT Sensor/transmisor de temperatura



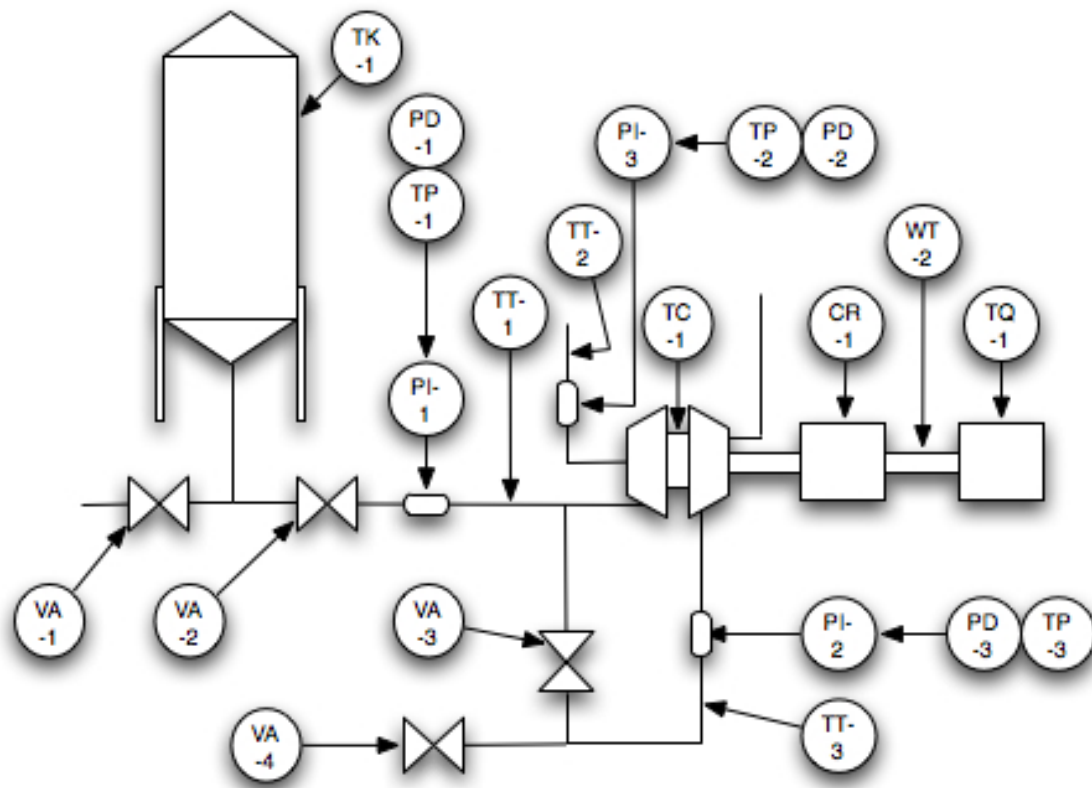


Figura 3. Diagrama de Tuberías e Instrumentos del Banco de Pruebas

Cabe notar que del Tubo de Pitot se desprenden dos sensores/transmisores:

- Sensor de presión diferencial
  - Con el dato que éste entrega se calcula la velocidad del aire en el tubo
- Sensor de presión
  - Mide la presión de flujo libre en la parte posterior de la cabeza del Tubo de Pitot. Este dato junto con el entregado por el sensor de temperatura, aguas abajo del Tubo de Pitot, permite calcular la densidad del aire en esa parte de la trayectoria y con esto el flujo másico de aire

#### 4.3 DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto se desarrolla en las siguientes etapas:

- Diseño y Adecuación del Montaje Experimental
- Construcción del Montaje

### 4.3.1 **Diseño y adecuación del montaje experimental**

#### 4.3.1.1 Identificación de equipos disponibles

En el CITEC se encontraron los siguientes equipos disponibles:

- Turbocompresor Rajay Modelo 3AT6EE10J2
- Tanque sumidero para aceite del sistema de lubricación del cojinete
- Bomba de aceite (de un automovil Renault 4) para el sistema de lubricación del cojinete
- Motor para la bomba del sistema de lubricación del cojinete
- Marco de acople mecánico del motor a la bomba

#### 4.3.1.2 Identificación de equipos y sistemas adicionales

A partir de la identificación de partes y equipos disponibles, se obtuvo la siguiente lista de elementos adicionales para la implementación del montaje:

- Sistema de acople del motor a la bomba
- Fuente de voltaje para el motor del sistema de lubricación del cojinete del turbocompresor
- Sensores de temperatura
- Sensores de presión
- Tubos de pitot
- Sistema de freno para medición de torque
- Sistema de adquisición de datos con interfase USB
- Tanque de aire comprimido
- Tubería y accesorios
- Válvulas
- Manómetros
- “Skid” de soporte para el montaje

#### 4.3.1.3 Diseño de equipos faltantes

Se diseñó un tanque de aire comprimido para las pruebas, el cual permitiera realizar descargas de pruebas de al menos 10s, según las especificaciones del turbocompresor.

En el Anexo 3 se encuentra el plano de detalle para construcción del tanque.

#### 4.3.1.4 Diseño de integración del montaje

Se diseñó un patín para el acople del turbocompresor junto con el sistema de lubricación

### 4.3.2 Construcción del montaje

#### 4.3.2.1 Arreglos y adecuaciones a equipos disponibles

- Se ajustaron las mangueras y acoples del sistema de lubricación, y se reemplazaron los elementos que estaban en malas condiciones
- Se colocó un sello en la tapa de la caja de aceite para prevenir fugas
- Se fabricó el sistema de acople del motor de lubricación a la bomba
- Se adecuó un tornillo en la posición de un perno dañado en la carcasa del compresor
- Se instaló un sello en la carcasa del compresor para frenar fugas

#### 4.3.2.2 Construcción de equipos y sistemas faltantes

- Se construyó un tanque de aire comprimido para las pruebas, con las siguientes características:
  - Tanque vertical de 1.5m<sup>3</sup> de capacidad
  - Diámetro 914mm
  - Presión de operación 150psi
  - Sistema de alivio a 200psi
  - Cilindro con unión soldada longitudinal en lámina de acero estructural SA-283 de 1/2"
  - Tapas ASME F&D en lámina de acero estructural SA-283 de 5/8"
  - Dos acoples para instrumentación NPT de 1/2"
  - Bridas ANSI de 2" en las dos tapas
  - Disco de ruptura a 200psi en la tapa superior
  - 4 apoyos en perfiles tipo L de 3"
- Se adquirieron y se ensamblaron las partes de la tubería en PVC con capacidad para 150psi



Figura 4. Modelo 3D de diseño del Tanque de Aire Comprimido y Tanque de Aire Comprimido fabricado

#### 4.3.2.3 Consecución de equipos y sistemas faltantes

- Se consiguieron sensores de temperatura con las siguientes características:
  - Marca Analog Devices AD22100ATZ
  - Rango de operación de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$
  - Precisión superior a  $\pm 2\%$  de toda la escala
  - Linealidad superior a  $\pm 1\%$  en toda la escala

- Coeficiente de temperatura de 22.5 mV/°C
- Excitación nominal +5V (+4V a +6.5V)
- Salida proporcional al voltaje de excitación
- Al hacer la verificación/calibración de los sensores, contra una RTD con elemento de platino, se obtuvo que se comportan acorde con las especificaciones dadas por el fabricante y que se ajustan en un 99.2% a una función lineal en el rango de trabajo esperado (10°C a 30°C)<sup>6</sup>

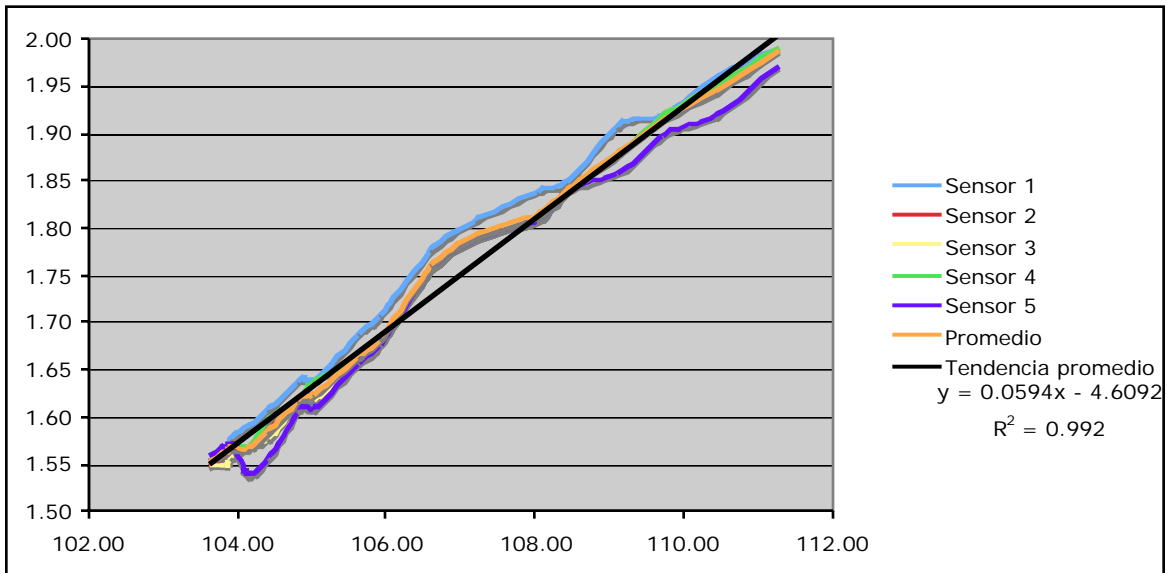


Figura 5. Voltaje de sensores AD22100ATZ contra resistencia de RTD

<sup>6</sup> Ver reporte completo de calibración en el Anexo 4.

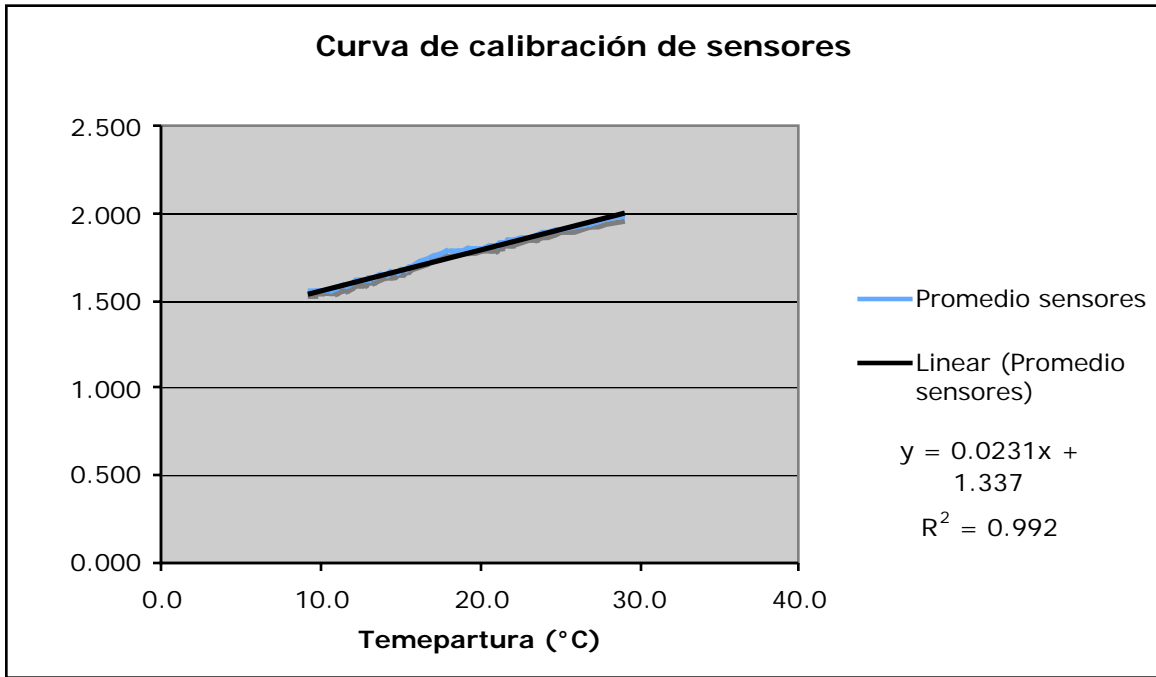


Figura 6. Voltaje de sensores AD22100ATZ contra Temperatura

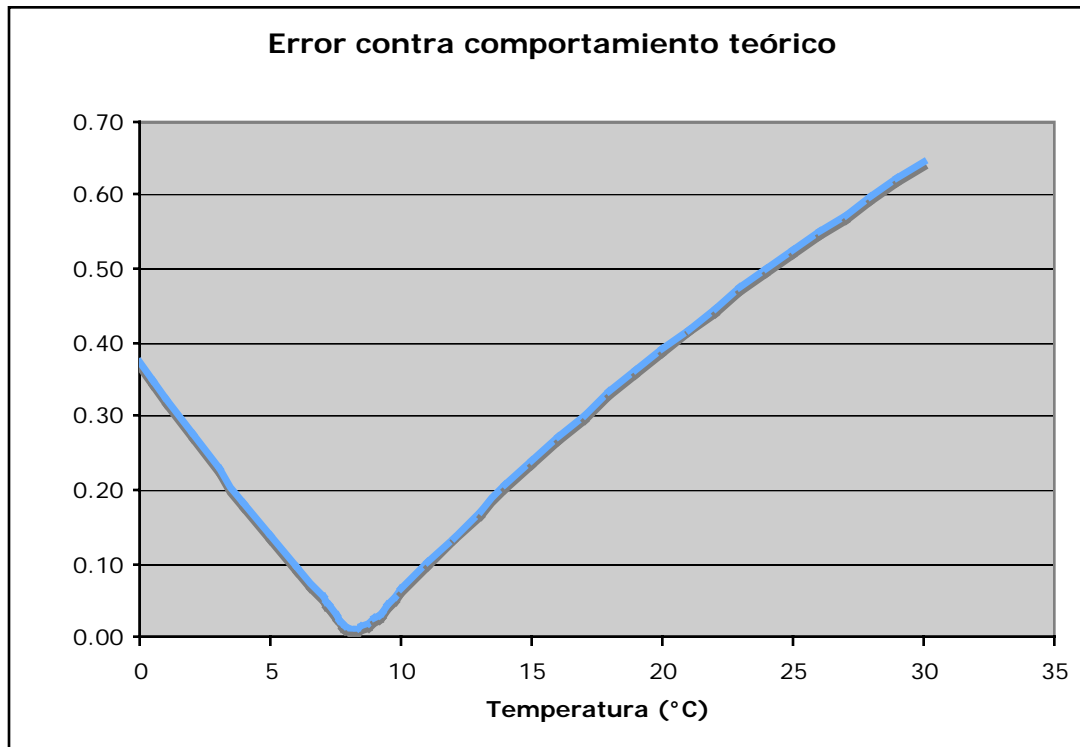


Figura 7. Error de sensores AD22100ATZ contra Temperatura

#### 4.3.2.4 Integración del montaje

Se construyó el patín de soporte para el turbocompresor y el sistema de lubricación de éste.

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

Figuras 8a y 8b. Patín de soporte del Turbocompresor con el sistema de Lubricación

Se armó también una tarjeta de acopio de conexiones de los sensores de temperatura.

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

Figuras 9a y 9b. Tarjeta de acopio de conexiones de los sensores de temperatura y conexión a LabJack U-12

Como última etapa para garantizar la adecuada integración del sistema, se verificó la tarjeta de adquisición de datos Labjack U-12, teniendo el siguiente resumen de resultados<sup>7</sup>:

Voltaje	1.001	1.499	1.601	1.702	1.804	2.001	Error
Medida	1.006	1.509	1.611	1.71	1.817	2.015	1 - 2V
Error	0.48%	0.69%	0.63%	0.46%	0.70%	0.68%	0.61%

#### 4.4 VERIFICACIÓN DEL MONTAJE

La mayor prueba de verificación que requiere el sistema es la prueba al sistema de lubricación ya que éste tiene varios elementos mecánicos que pueden fallar.

Inicialmente se probó la bomba con recirculación directa al tanque sumidero (sin pasar por el turbocompresor) y la prueba fue exitosa . El acople del motor a la bomba soportó la carga y se logró una presión de 25psi. En esta prueba se detectó que en el retorno al tanque sumidero no hay un sello muy adecuado y por esto se debe garantizar que el tanque siempre este bien nivelado para que el goteo no produzca derrames sino que el aceite caiga correctamente en el tanque.

En la segunda fase se probó el sistema completo. Acá se encontraron algunos problemas. Primero que todo, el motor no fue capaz de mover la carga al tener que circular el aceite por el cojinete del turbocompresor. Para seguir con la verificación del sistema se acopló un taladro al eje de la bomba y se operó variando la velocidad. Con este último montaje se logró bombear exitosamente el aceite por el sistema entre 30 y 40psi, y a aproximadamente 100rpm. Sin embargo, acá surgió un nuevo inconveniente. Los sellos del turbocompresor están fallando y por lo tanto hubo fuga de aceite por la descarga de la turbina así como por la admisión del compresor.

---

<sup>7</sup> Ver reporte completo en el Anexo 5



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La primera y más importante conclusión que se obtiene del trabajo es que el proyecto es viable. Aunque para la etapa de investigación y desarrollo el aspecto económico no sea la fortaleza del proyecto (sin dejar de ser viable), en el área técnica y operativa el proyecto tiene suficiente validez para seguir siendo desarrollado y esperar resultados favorables.

La integración del sistema se va consolidando a medida que se diseñan, reparan, ajustan y fabrican las partes. Al hacer la primera gran revisión de la integración de todo el sistema, para verificar y garantizar que todo encaja y funciona adecuadamente, se ha encontrado que el turbocompresor tiene fallas en el sistema de lubricación donde los sellos están presentando fugas hacia el compresor y la turbina, y también se encontraron goteos en algunos de los tapones. Por otra parte, se evidenció que es necesario instalar un motor de mayor potencia para poder suplir la demanda del sistema de lubricación completo. Los sensores de temperatura eran el instrumento con mayor potencial para presentar fallas pues son elementos sueltos, a diferencia de los sensores de presión que son unidades selladas listas para trabajar en un amplio rango de condiciones y con un ajuste y sistema de acople estándar (rosca NPT de 1/4"). Los sensores de temperatura se acondicionaron y se probaron, superando así uno de los mayores potenciales de falla del proyecto. La celda de carga para el sistema de medición de torque al freno puede ser sensible y difícil de manejar como los sensores de temperatura y por eso se debe trabajar con el mismo cuidado que los sensores de temperatura.

Las recomendaciones para concluir, son las siguientes:

- Se debe hacer una rutina de mantenimiento mayor al turbocompresor en la cual se reemplacen los sellos que fallaron así como verificar el ajuste de todos los tapones del sistema de lubricación por donde también hubo fugas de aceite en las pruebas
- Se debe hacer el diseño detallado del sistema de medición de torque al freno y construirlo. Se debe tener especial atención en la calibración de la celda de carga pues es un elemento suelto, que se debe instalar y ajustar adecuadamente para garantizar su correcto funcionamiento.
- Se debe conseguir un nuevo motoreductor para la bomba del sistema de lubricación. Se recomienda utilizar un equipo de al menos 20W para garantizar su correcto funcionamiento. La velocidad que se encontró adecuada, para conseguir la presión recomendada de 35psi, fue 100rpm.
- Por ultimo se recomienda no olvidar que a la descarga del tanque de aire comprimido, desde más de 100psi, el sistema girará a muy altas revoluciones y producirá un alto nivel de ruido por lo cual se recomienda tener siempre un procedimiento muy claro de trabajo y utilizar todos los elementos de seguridad personal (tapaoídos, gafas de seguridad, guantes y overol).

Teniendo diseñado el banco de pruebas para el turbocompresor, sólo falta atender las recomendaciones, hacer los ajustes finales y poner a punto el sistema para empezar la etapa de pruebas del sistema completo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ASME. 1998. Boiler & pressure vessel code. ASME Press.

HAMILTON, S.L. 2000. Project Title: Micro Turbine Generator Program, Southern California Edison,

AUNGIER, R.H. 2003. Axial-Flow Compressors. A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis, ASME Press.

CUERVO, R.E., 1993. Investigación y Desarrollo de una Micro-turbina Axial Tubular Eficiente. Universidad de los Andes.

Eugene, F.M. 2001. Pressure vessel handbook. Pressure Vessel Publishing.

Giraldo, R.A. 2003 Diseño de un turbomotor para automóvil a base de aire comprimido. Universidad de los Andes.

Lenz, C. 1998. Diseño y construcción de un banco de turbina de gas a partir de un turbocargador. Universidad de los Andes.

Ordóñez, G.A. 2005. Reconstrucción y diseño de una turbo-turbina. Universidad de los Andes.

SONNTAG, R.E. 1998. Fundamentals of Thermodynamics. John Wiley & Sons.

STREET, R.L. 1996. Elementary Fluid Mechanics. John Wiley & Sons.

<http://auto.howstuffworks.com/air-car.htm>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://auto.howstuffworks.com/fuel-cell.htm>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://freeenergynews.com/Directory/CompressedAir>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://quasiturbine.promci.gc.ca/QTPneumatique.html>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://home.ctlnet.com/~robotguy67/classic\\_cars/air\\_engines/V-Twin/air\\_engines.htm](http://home.ctlnet.com/~robotguy67/classic_cars/air_engines/V-Twin/air_engines.htm), recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.cogeneration.net/compressed\\_air\\_energy\\_storage.htm](http://www.cogeneration.net/compressed_air_energy_storage.htm), recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.consrv.ca.gov/DOG/qh\\_well.htm](http://www.consrv.ca.gov/DOG/qh_well.htm), recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.eere.energy.gov/cleancities>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/abcs.html>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.findarticles.com/p/articles/mi\\_m0WV/is\\_1999\\_March\\_29/ai\\_54279772](http://www.findarticles.com/p/articles/mi_m0WV/is_1999_March_29/ai_54279772), recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.fuelcellstore.com>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.gerente.com/revistas/gerente/0804/colombia/inversio1c\\_0804.html](http://www.gerente.com/revistas/gerente/0804/colombia/inversio1c_0804.html), recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.h2fc.com>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.luxfercylinders.com/products/scuba/specifications/us\\_imperial.shtml](http://www.luxfercylinders.com/products/scuba/specifications/us_imperial.shtml), recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.mdi.lu>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://www.njscuba.net/gear/eqpt\\_05\\_tanks.html](http://www.njscuba.net/gear/eqpt_05_tanks.html), recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.quasiturbine.com>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://quasiturbine.promci.qc.ca/QTPneumatique.html>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.sanikbattery.com>, recuperada Mayo 15 de 2005

<http://www.theaircar.com>, recuperada Mayo 15 de 2005

[http://xtronics.com/reference/energy\\_density.htm](http://xtronics.com/reference/energy_density.htm), recuperada Mayo 15 de 2005

## **Anexo 1 – Densidades de Energía y Costos de Energía**

## Densidades de Energía

Contenedor de Energía	Densidad de Energía			
	Volumétrica		Por peso	
Diesel	10900	W*hr/L	13800	W*hr/kg
Gasolina	9700	W*hr/L	12200	W*hr/kg
GNC (3000psi)	7200	W*hr/L	12100	W*hr/kg
H2 (2200 psi)	405	W*hr/L	39000	W*hr/kg
H2 (atm)	2,7	W*hr/L	39000	W*hr/kg
Batería de plomo	40	W*hr/L	25	W*hr/kg
Batería de NiCd	95	W*hr/L	31	W*hr/kg
Batería de NiHM	167	W*hr/L	53	W*hr/kg
Volante	210	W*hr/L	120	W*hr/kg
Aire Comp. (3000 psi)	5,7	W*hr/L	28	W*hr/kg

Tomado de [http://xtronics.com/reference/energy\\_density.htm](http://xtronics.com/reference/energy_density.htm)

## Costos Comparativos de Energía

### Aire Comprimido

Energía entregada	1,00	kW*hr
Eficiencia compresor	0,60	
Eficiencia turbina	0,60	
Eficiencia compresión	0,80	
Consumo energía eléctrica	3,47	kW*hr
Costo electricidad	200,0	\$/kW*hr
Costo energía aire comprimido	694,4	\$/kW*hr

### Gasolina

Energía entregada	1,00	kW*hr
Eficiencia global del motor	0,20	
Energía gasolina	5,00	kW*hr
Precio gasolina	5440	\$/gal
Costo gasolina	148,2	\$/kW*hr
Costo energía gasolina	740,9	\$/kW*hr

### Diesel

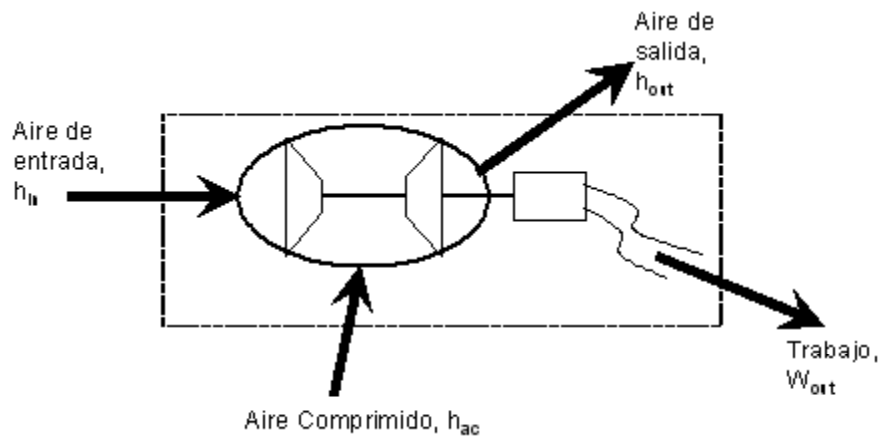
Energía entregada	1,00	kW*hr
Eficiencia motor	0,20	
Energía diesel	5,00	kW*hr
Precio diesel	3825	\$/gal
Costo diesel	92,7	\$/kW*hr
Costo energía diesel	463,6	\$/kW*hr

### GNC

Energía entregada	1,00	kW*hr
Eficiencia global del motor	0,20	
Energía GNC	5,00	kW*hr
Precio GNC	860	\$/m3std
Costo GNC	24,4	\$/kW*hr
Costo energía GNC	121,9	\$/kW*hr

## **Anexo 2 – Cálculos Termodinámicos Iniciales**

## CÁLCULOS TERMODINÁMICOS



El balance de entalpías es el siguiente:

$$\dot{m}_{in} \cdot h_{in} + \dot{m}_{ac} \cdot h_{ac} - \dot{m}_{out} \cdot h_{out} = W_{out} = v \cdot i \cdot \eta_{alt}$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{ac}$$

$$\dot{m}_{in} = \frac{v \cdot i \cdot \eta_{alt} - \dot{m}_{ac} \cdot (h_{ac} - h_{out})}{(h_{in} - h_{out})}$$

Como se tiene el cambio de presión en cada etapa (compresor y turbina), y se pueden calcular los caudales, se tiene un punto de operación en cada curva.

Como el eje es acoplado también se tiene la velocidad de rotación, que está ligada al requerimiento del alternador.

Las variables con las que se itera el proceso son la masa de entrada de aire atmosférico, la masa de entrada de aire comprimido y la velocidad del eje en función de la corriente y el voltaje en el alternador.

$$kJ \equiv 1000J$$

$$h_{in} := 298.615 \frac{kJ}{kg} \quad \text{Entalpía del aire de entrada a 0.1MPa y } 25^{\circ}C$$

$$h_{ac} := 309.18 \frac{kJ}{kg} \quad \text{Entalpía del aire comprimido a 1MPa y } 25^{\circ}C$$

$$h_{out} := 290.33 \frac{kJ}{kg} \quad \text{Entalpía del aire de salida a 0.1MPa y } 6^{\circ}C$$

$$W_{out} := 0.5kW \quad \text{Potencia de salida}$$

$$\dot{m}_{ac} := 0.0005 \frac{kg}{s} \quad \text{Masa de entrada de aire comprimido}$$



Volumen y masa de aire dentro del tanque

$$V_{\text{tanque}} := 80\text{ft}^3 \quad m_{\text{tanque}} := V_{\text{tanque}} \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad m_{\text{tanque}} = 2.265\text{kg}$$

Tiempo de autonomía del sistema

$$t_{\text{ac}} := \frac{m_{\text{tanque}}}{m_{\text{ac}}} \quad t_{\text{ac}} = 75.512\text{min}$$

Flujo de volumen y masa de aire atmosférico

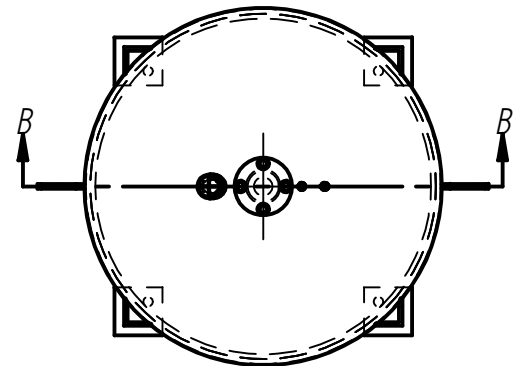
$$m_{\text{in}} := \frac{W_{\text{out}} - m_{\text{ac}} \cdot (h_{\text{ac}} - h_{\text{out}})}{(h_{\text{in}} - h_{\text{out}})} \quad \rho_{\text{in}} := 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad q_{\text{in}} := \frac{m_{\text{in}}}{\rho_{\text{in}}}$$

$$m_{\text{in}} = 0.059 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad q_{\text{in}} = 0.059 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

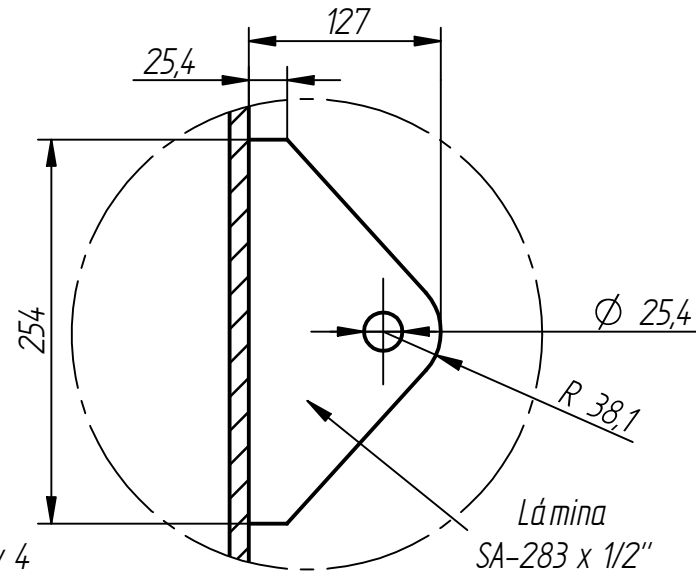
**Anexo 3 – Plano de Detalle de Construcción del Tanque de Aire  
Comprimido**

## **Anexo 4 – Reporte de Verificación de Sensores de Temperatura**

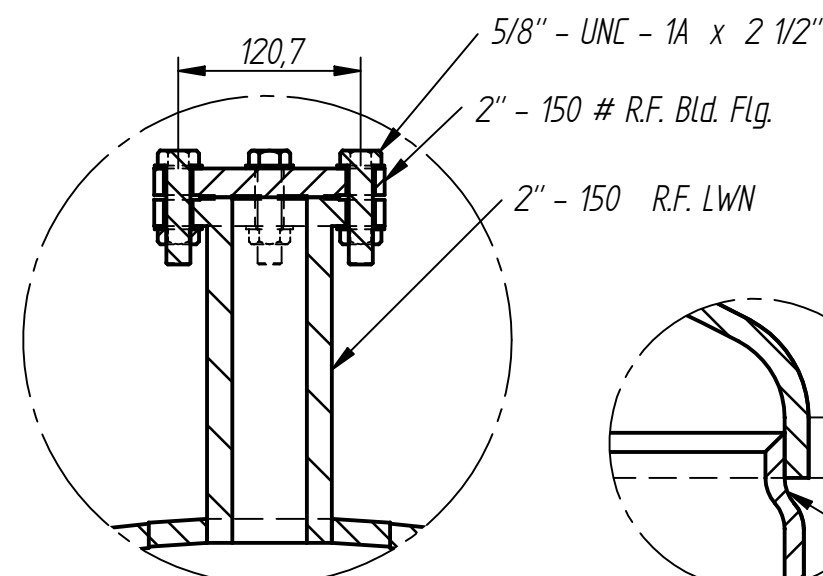
**Anexo 5 – Reporte de Verificación de Tarjeta de Adquisición de  
Datos Labjack U-12**



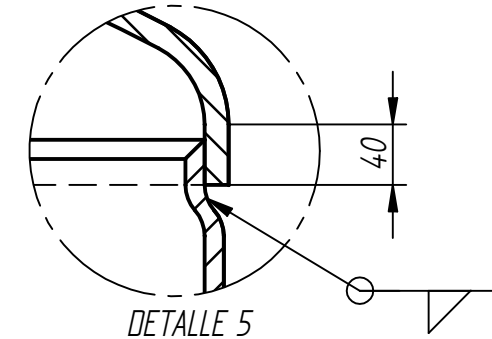
TANQUE DE AIRE COMPRIMIDO  
Planta  
Escala 1:20



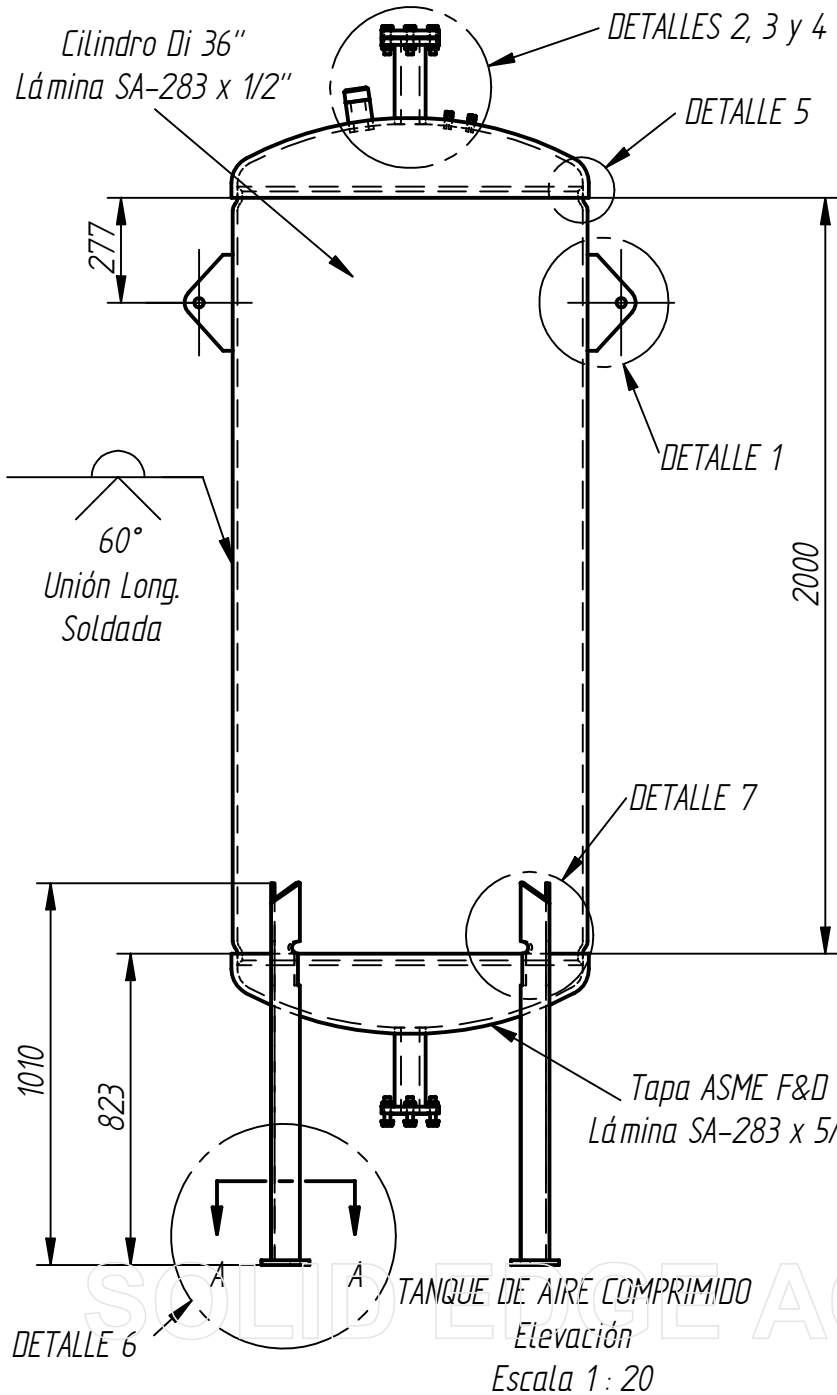
DETALLE 1  
Orejas de Izaje  
Escala 1:5



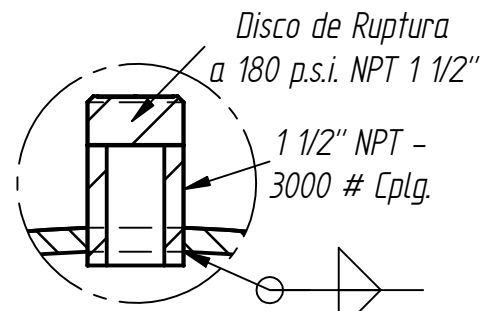
DETALLE 4  
Bridas Cabezas  
Escala 1:5



DETALLE 5  
Unión del Tanque y las Tapas  
Escala 1:5



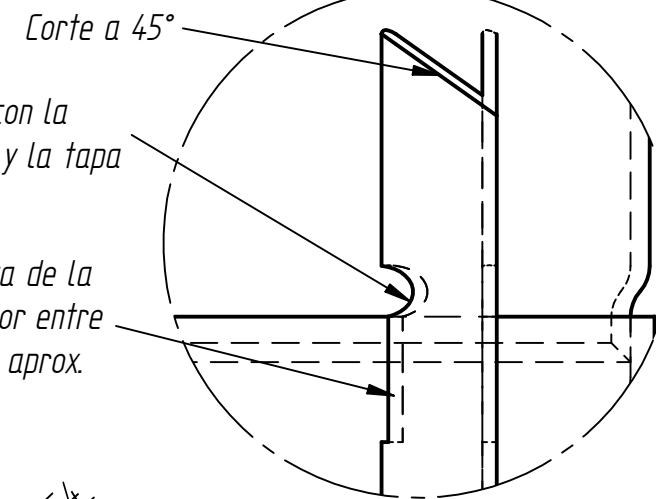
TANQUE DE AIRE COMPRIMIDO  
Elevación  
Escala 1:20



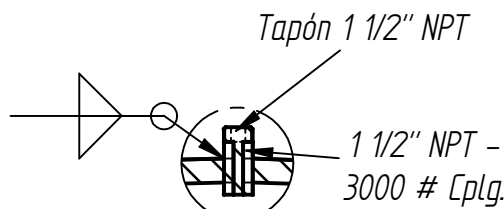
DETALLE 2  
Acople del Disco de Ruptura  
Escala 1:5

Muesca para no interferir con la soldadura entre el cilindro y la tapa

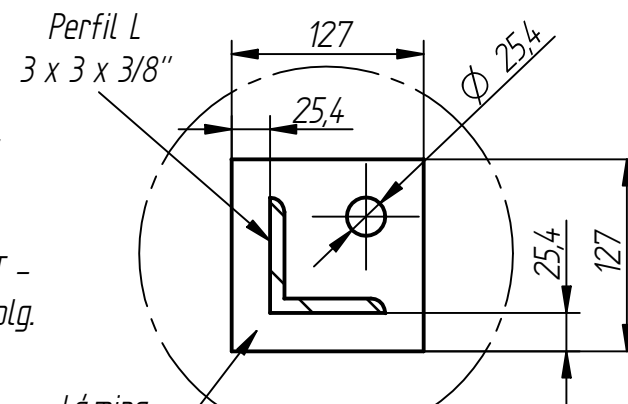
Recorte para la parte recta de la tapa - diferencia de espesor entre el cilindro y la tapa 3.2mm aprox.



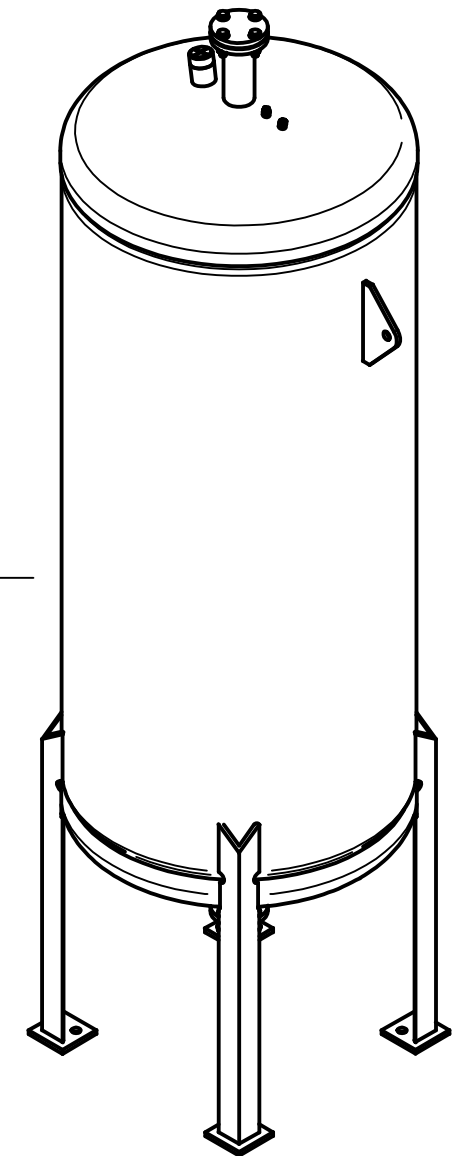
DETALLE 7  
Detalle Patas Tanque  
Escala 1:5



DETALLE 3  
Acople para Instrumentación  
Escala 1:5



DETALLE 6  
Apoyos Patas Tanque  
Escala 1:5



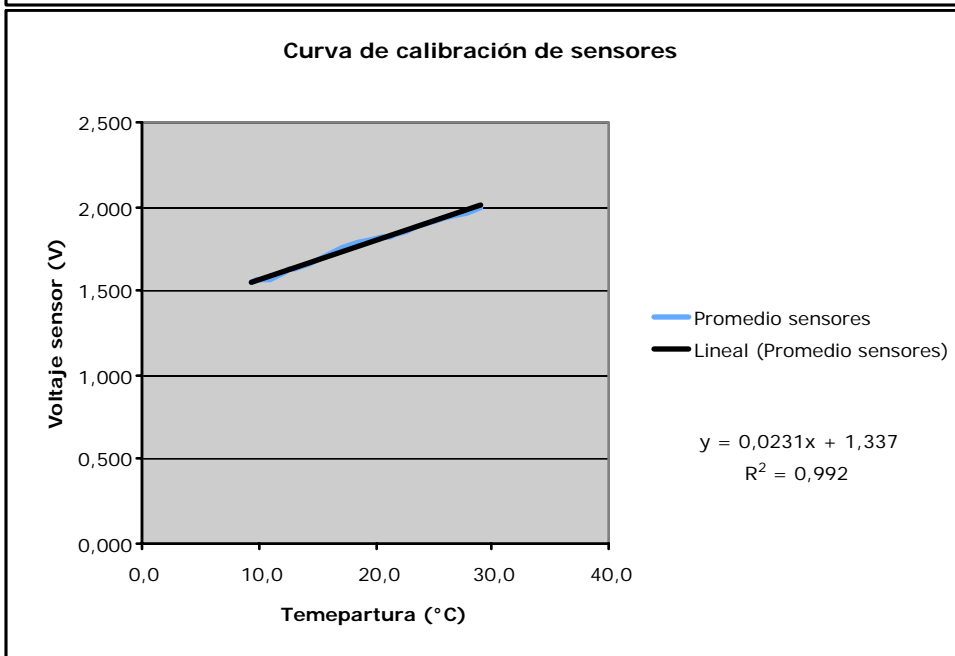
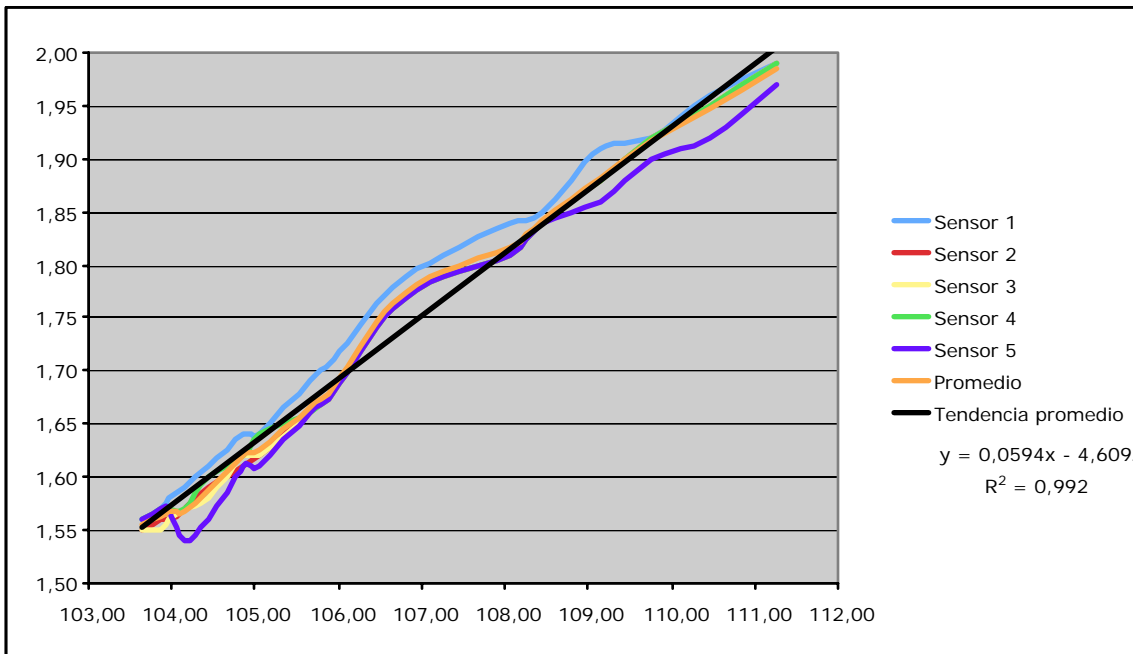
TANQUE DE AIRE COMPRIMIDO  
Isométrico  
Escala 1:20

- Notas:
1. El tanque debe ir pintado con pintura anticorrosiva por dentro y por fuera.
  2. Todas las soldaduras deberán ser inspeccionadas parcialmente por ultrasonido.
  3. El tanque deberá ser probado hidrostáticamente a 450 psi.

0	Ago-8-05	Juan Camilo Fuentes V.	Jaime Loboquerrero
Rev. No.	Fecha	Nombre	Aprobó
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES INGENIERÍA MECÁNICA			Plano Tanque Aire Comprimido Rev 0
Salvo indicación contraria cotas en milímetros			Archivo: JCF-T2-TKAC-01.dft Escala: La indicada Hoja 1 de 1

# CALIBRACION/VERIFICACION SENSORES DE TEMPERATURA ANALOG AD22100ATZ

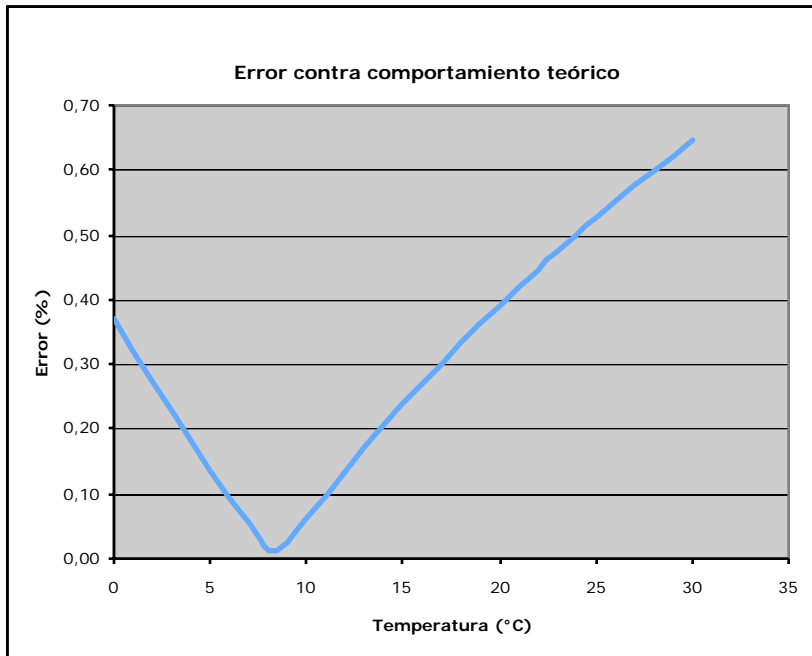
Fuente	4,88 V								
R medida	R1	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT promedio	Temp (°C)	
103,6	103,65	1,56	1,55	1,55	1,56	1,56	1,556	9,3	
103,8	103,85	1,57	1,56	1,55	1,57	1,57	1,564	9,8	
103,9	103,95	1,58	1,56	1,56	1,57	1,57	1,568	10,1	
104,1	104,15	1,59	1,57	1,57	1,57	1,57	1,568	10,6	
104,4	104,45	1,61	1,59	1,58	1,60	1,60	1,588	11,4	
104,8	104,85	1,64	1,61	1,62	1,62	1,61	1,620	12,4	
105,0	105,05	1,64	1,62	1,62	1,64	1,61	1,626	12,9	
105,6	105,65	1,69	1,66	1,66	1,66	1,66	1,666	14,5	
105,9	105,95	1,71	1,68	1,68	1,68	1,68	1,686	15,3	
106,6	106,65	1,78	1,76	1,76	1,76	1,76	1,764	17,1	
107,2	107,25	1,81	1,79	1,79	1,79	1,79	1,794	18,6	
108,0	108,05	1,84	1,81	1,81	1,81	1,81	1,816	20,7	
108,4	108,45	1,85	1,84	1,84	1,84	1,84	1,842	21,7	
109,1	109,15	1,91	1,88	1,88	1,88	1,86	1,882	23,5	
109,7	109,75	1,92	1,92	1,92	1,92	1,90	1,916	25,1	
110,4	110,45	1,96	1,95	1,95	1,95	1,92	1,946	26,9	
111,2	111,25	1,99	1,99	1,99	1,99	1,97	1,986	28,9	



Medido con fuente a	Teórico con fuente a
4.88V	4.88V
0,0231	0,0225
1,337	1,3420

T (°C)	Error (%)
0	0,37
1	0,32

2 0,27  
 3 0,23  
 4 0,18  
 5 0,14  
 6 0,09  
 7 0,05  
 8 0,01  
 9 0,03  
 10 0,06  
 11 0,10  
 12 0,14  
 13 0,17  
 14 0,21  
 15 0,24  
 16 0,27  
 17 0,30  
 18 0,33  
 19 0,36  
 20 0,39  
 21 0,42  
 22 0,45  
 23 0,47  
 24 0,50  
 25 0,53  
 26 0,55  
 27 0,57  
 28 0,60  
 29 0,62  
 30 0,64



Fórmula para calcular error.  
 Corresponde a 1 menos el valor absoluto del resultado experimental sobre el resultado teórico.

$$err = 1 - \frac{0,0231x + 1,337}{\left(\frac{4,88V}{5V}\right) \cdot (0,0225x + 1,375V)}$$





