

PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA TURBINAS HIDRÁULICAS

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.: Benavides H. Rodolfo J.,
Lopez Y. Leibniz Y.
para optar al Título
de Ingeniero Mecánico**

Tutor Académico: Prof. Pedro Lecue

Tutor Industrial: Ing. José Tomas Barei

**Jurados: Prof. José L. Perera
Prof. Gilberto Barbone**

ESQUEMA DE PRESENTACIÓN

- **INTRODUCCIÓN**
- **INFORMACIÓN DE LA EMPRESA**
- **OBJETIVOS**
- **CARACTERÍSTICAS DE LAS TURBINAS MICHELL-BANKI**
- **CONCEPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN**
- **SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN**
- **INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN**
- **SISTEMA DE CABLEADO Y PROTECCIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS.**
- **DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES DE UN MODELO**
- **CONCLUSIONES**
- **RECOMENDACIONES**

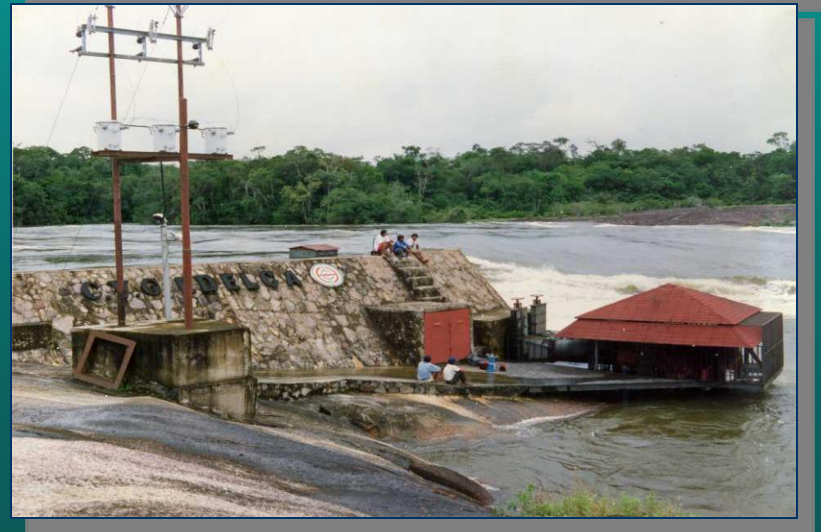
INTRODUCCIÓN

La Electrificación del Caroní C.A. (EDELCA) es una empresa del Estado Venezolano encargada de desarrollar y operar los grandes proyectos hidroeléctricos en el margen del río Caroní. EDELCA se encarga además de la construcción, mantenimiento de las líneas de transmisión que salen desde sus grandes centrales y entre otras cosas se encarga del desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas las cuales se denominan microcentrales.

La empresa ha desarrollado con tecnología propia Turbinas Hidráulicas Michell-Banki, en tal sentido, surgió la necesidad de diseñar un Banco de Pruebas para realizar ensayos a los modelos o prototipos de turbinas hidráulicas antes de ser instaladas en la respectiva microcentral.

El Dpto de Estudios Hidroeléctricos en el desarrollo de las Microcentrales

El Dpto de Estudios Hidroeléctricos es el encargado de realizar el estudio y el desarrollo de las Microcentrales, se encarga de realizar todo lo concerniente a equipos electromecánicos, turbinas, Supervisión de obras civiles, delegación de algunas construcciones. Los proyectos de desarrollo de Microcentrales se completan con la participación del Dpto. de Microcentrales, con lo cual se llega a realizar las diferentes fases de diseño de las unidades y la ingeniería de detalle de los equipos mecánicos, que luego construyen en su propio taller, muchas veces a partir de piezas de otras maquinarias.



Microcentrales desarrolladas por EDELCA.

C.V.G EDELCA, C.A

MICROCENRALES

MICROCENRAL	UBICACIÓN	POTENCIA INSTALADA (kw)	N° DE UNIDADES	TIPO DE TURBINAS	N° DE HAB. SERVIDOS (HAB.)	AÑO INICIO	ENERGIA GENERABLE ** (Mwh/AÑO)
ARAUTAMERÚ	YURUANÍ	150	6	BANKI	1200	1988	657
WONKEN ***	MACARUPUEY	20	1	BANKI	500	1984	87,6
WONKEN II	MACARUPUEY	116	2	BANKI	500	2000	508,08
LA CIUADAELA	APONGUAO	120	2	BANKI	350	1994	525,6
CANAIMA	CARRAO	800	2	BANKI	1000	1994	3504
CUAO	CUAO	30	2	HÉLICE	250	1990	131,4
LA ESMERALDA	CAVARAJÜRI	200	1	PELTON		*	876
STA. MARÍA DEL EREBATO	FAKÛIRA	60	1	BANKI		*	262,8
IMATACA	CANONOIMA	60	1	PELTON		*	262,8
ICABARÚ	UAIPARÚ	1000	2	FRANCIS	6000	*	4380
KAVANAYEN	APACAIRO	110	1	FRANCIS	700	1957	481,8
KAMARATA	TAPERE	60	1	FRANCIS	480	1962	262,8
STA. ELENA DE UAIREN I	YURUANÍ	3600	4	KAPLAN	11000	*	15768
STA. ELENA DE UAIREN II	YURUANÍ	3600	4	KAPLAN	11000	*	15768

* EN ESTUDIO

** SE ESTIMA PARA ESTOS SISTEMAS AISLADOS UN FACTOR DE CARGA DE 0,5

INTRODUCCIÓN

En la primera fase del Proyecto se realizó el rediseño del sistema de simulación del Banco de Pruebas, el cual fue desarrollado en el trabajo especial de grado de los estudiantes: Colomine, G; Núñez, R. Escuela de Ing. Mecánica. UCV. 2000.

El presente trabajo permitirá completar otra etapa del proyecto del Banco de Pruebas el cual es necesario para integrar el Laboratorio hidráulico para el año próximo.

El objeto del presente proyecto consiste en el Estudio y desarrollo de un Sistema de Instrumentación y Control para medir las variables o parámetros que requiere el Banco de Pruebas. Basándonos en la información aportada por los trabajos realizados por la empresa, este trabajo presenta algunas propuesta y modificaciones necesarias para el mejor funcionamiento del Banco de Pruebas.

Objetivo General

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un Sistema de Instrumentación y Control para realizar la medición de los parámetros de un Banco de Pruebas proyectado por la empresa EDELCA, para ensayar Turbinas Hidráulicas Michell-Banki.

Objetivos Específicos

- ✓ **Evaluar la disponibilidad y condiciones de los materiales y equipos, adquiridos originalmente con el objeto de ver si son adecuados para ser utilizados en el Banco de pruebas.**
- ✓ **Verificar si es necesario cambiar y agregar algunos equipos de instrumentación para lograr las condiciones deseadas.**
- ✓ **Evaluar y definir el rango de operación de los instrumentos de acuerdo a la solicitud de los parámetros involucrados en el proceso.**
- ✓ **Configurar la instalación requerida y el desmontaje racional de los equipos e instrumentos de medición.**

Objetivos Específicos

- ✓ **Diseñar el sistema de enfriamiento del equipo de medición de potencia.**
- ✓ **Seleccionar los tipos de dispositivos de transformación de señal que se deberán instalar para los equipos e instrumentos de medición.**
- ✓ **Seleccionar la mejor ubicación de un tablero de lectura de los parámetros a medir (Diferencial de presión, Torque, RPM, etc).**
- ✓ **Realizar un procedimiento para calcular los parámetros principales de los modelos a ensayar de acuerdo a las condiciones hidráulicas que pueda entregar el sistema de simulación**

Características del laboratorio de Microcentrales

Ubicación: Esta localizado dentro del campamento Macagua, el Laboratorio pertenece al sector del Dpto de Microcentrales, y esta en el área adyacente a los desarrollos de los modelos hidráulicos de Tocomá y Caruachi del Dpto. de Hidráulica, a una altura de 79 metros sobre el nivel del mar.

Infraestructura: Un galpón que contempla el espacio para los equipos del banco de pruebas, con el sistema completo de simulación y medición alrededor del pozo donde alojaran los prototipos de prueba y a través del cual se efectuará la alimentación y descarga de agua. El piso destinado al banco de pruebas tiene vigas de acero empotradas y enrasadas.

Se cuenta con un embalse a una altura de 4 metros sobre el nivel de la planta baja de la edificación. La toma inferior del embalse se encuentra aproximadamente a 20 metros de distancia de la entrada del sistema de bombeo y puede suplir un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.



Características de la Turbina Michell-Banki

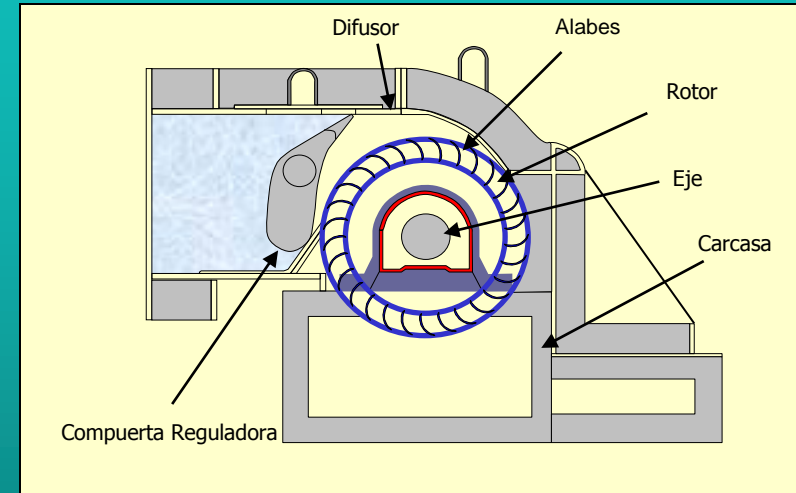
La turbina Michell-Banki es una turbina de acción de flujo transversal y de admisión parcial, que se utiliza generalmente en aquellos proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas donde se aprovecha un salto y un caudal medio.

Su rango de aplicación está comprendido dentro del rango de aplicación de la turbina Francis, a la cual la supera en eficiencia cuando la turbina opera la mayor parte del tiempo a carga parcial.

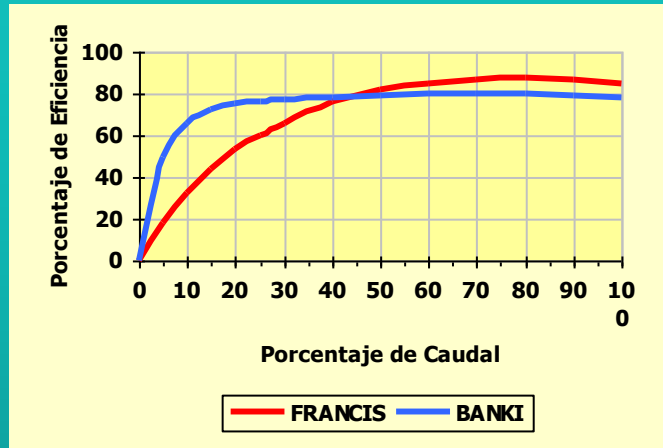
Una ventaja de la turbina Michell-Banki con respecto a la turbina Francis lo constituye su reducido costo de fabricación.

Partes principales de la turbina Michell-Banki:

- ✓ Distribuidor
- ✓ Rotor
- ✓ Álabes
- ✓ Eje
- ✓ Carcasa
- ✓ Compuerta Reguladora



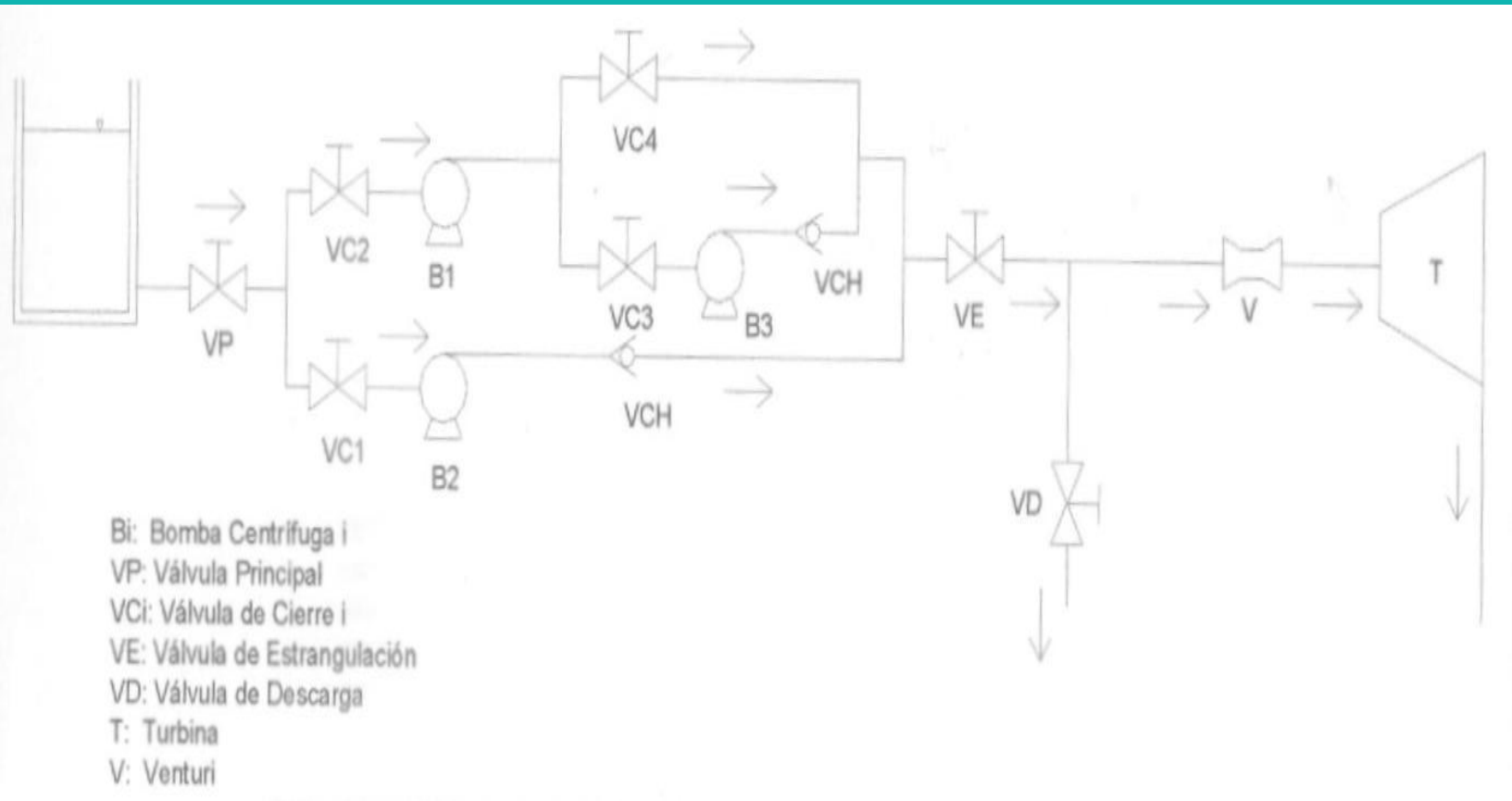
Características de la Turbina Michell-Banki



Eficiencia de una Turbina Michell-Banki y Francis

Características principales de la turbina Michell-Banki					
Inventor y año de patente	Ns (rpm,HP,m)	Caudal Q (m ³ /s)	Altura H (m)	Potencia P(kW)	Rendimiento $\eta_{\text{máx}}$ (%)
A.G. Michell (Australia) 1903 D. Banki (Hungria) 1917-1919	40-160	0.025-5	1-50	1-750	82

Sistema de simulación establecido



Concepción del Sistema de Medición

Parámetros a ser medidos en el Banco de Pruebas:

En un Banco de Pruebas para Turbinas Hidráulicas (BPTH) se realizan ensayos. Con el fin de medir algunas variables, que son requeridas para calcular la eficiencia.

Estas variables o parámetros principales son:

- ✓ **Potencia al eje de la turbina (P_{ejeR}).**
- ✓ **Caudal de entrada en la turbina (Q).**
- ✓ **Altura total a la entrada de la turbina (H_n).**
- ✓ **RPM del rotor de la turbina (n).**
- ✓ **Torque entregado por la turbina (T).**

Concepción del Sistema de Medición

**Potencia máxima de la Turbina Michell-Banki
a ensayar en el Banco de Pruebas.**

**Ecuaciones para el cálculos de la potencia máxima suministrada
por el sistema de simulación:**

**Potencia Hidráulica a la salida
del distribuidor de la Turbina**

$$P_{he} = Q \times H_{ne} \times \gamma$$

**Altura neta a la entrada del
Rotor**

$$H_{ne} = H_{De} + H_{Ee}$$

Turbina hidráulica de acción ($H_{Ee} = 0$)

$$H_{ne} = H_{De}$$

**Altura neta a la entrada del
Rotor en función de las pérdidas
Hidraulicas**

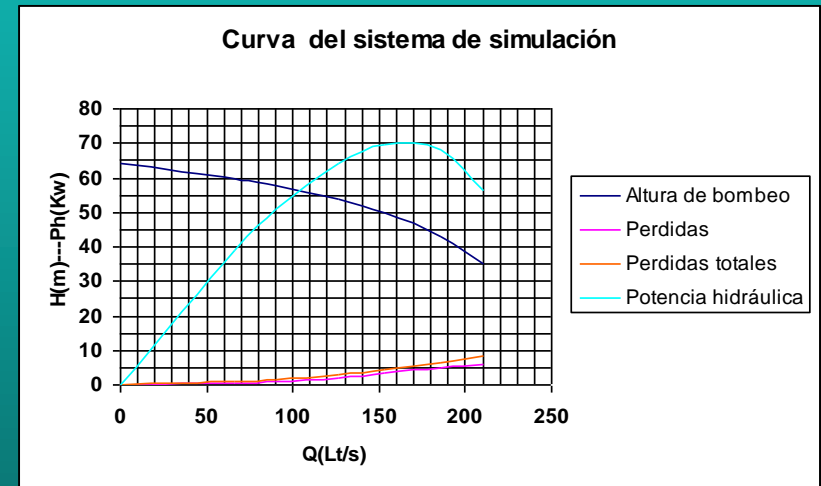
$$H_{ne} = H_T - h_{fT}$$

Potencia hidráulica máxima del sistema del simulación

La mayor potencia hidráulica que puede entregar el sistema de simulación es cuando el mismo se opera en serie. Con el fin de obtener la potencia máxima que entrega el sistema se procede del producto de los valores de altura neta H_n por el caudal para cada punto de la curva, obteniéndose una curva de Potencia Vs Caudal.

Potencia hidráulica Máxima del sistema de Simulación:

$P_{he} = 69500 \text{ W.}$



POTENCIA AL EJE DE LA TURBINA

Ecuaciones para el cálculos de la potencia máxima de la Turbina a ensayar:

Potencia en el eje del rotor de la turbina(P_{ejeR}):

$$P_{ejeR} = P_{he} \times \eta_R$$

El rendimiento de la turbina Michell-Banki se aproxima en 0,84

$$P_{ejeR} = 69500W \times 0,84 = 583180W$$

Potencia máxima al eje de la Turbina:

$$P_{ejeR} = 58380W$$

Caudal máximo y mínimo que entrega el sistema de simulación

Caudal máximo:

Cuando el sistema de simulación opera en paralelo se obtiene el máximo caudal suministrado por el Banco de Pruebas (BPTH) hacia el prototipo de turbina.

$$Q_{\max} = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

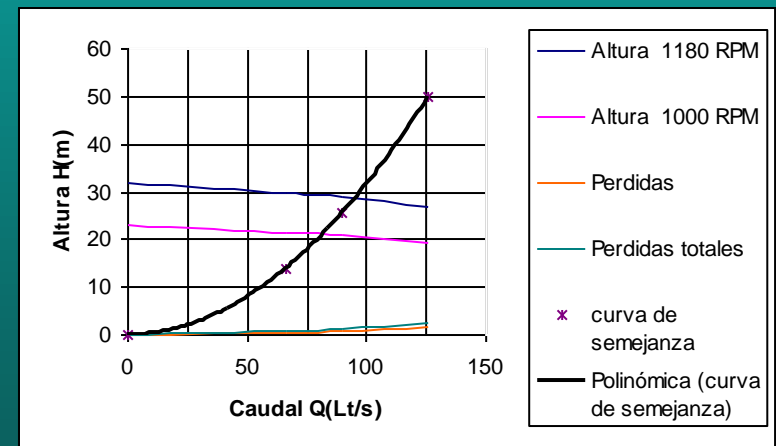
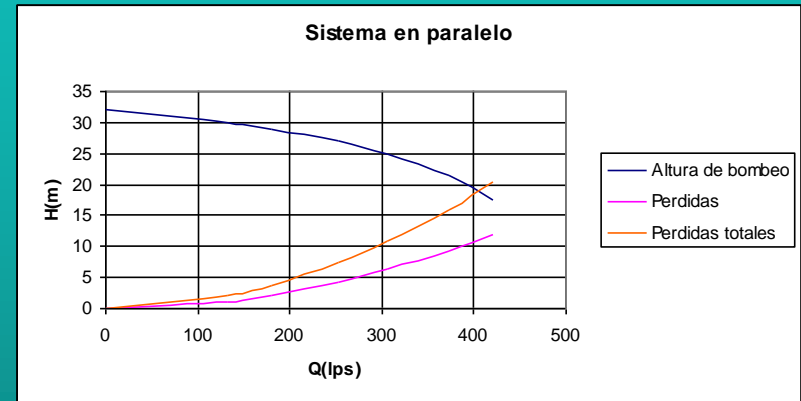
Caudal mínimo:

El caudal mínimo se obtiene cuando el sistema opera con una sola bomba con la velocidad mínima (1000 RPM). La bomba permite un caudal mínimo de trabajo de $0,096 \text{ m}^3/\text{s}$ trabajando a 1180 RPM. Al trabajar con 1000 RPM el caudal mínimo que puede manejar la bomba sería menor. Según el gráfico

$$Q_{\min} = 0,081 \text{ m}^3/\text{s}.$$

OLADE acepta como caudal mínimo en una Turbina Michell-Banki

$$Q_{\min} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}.$$



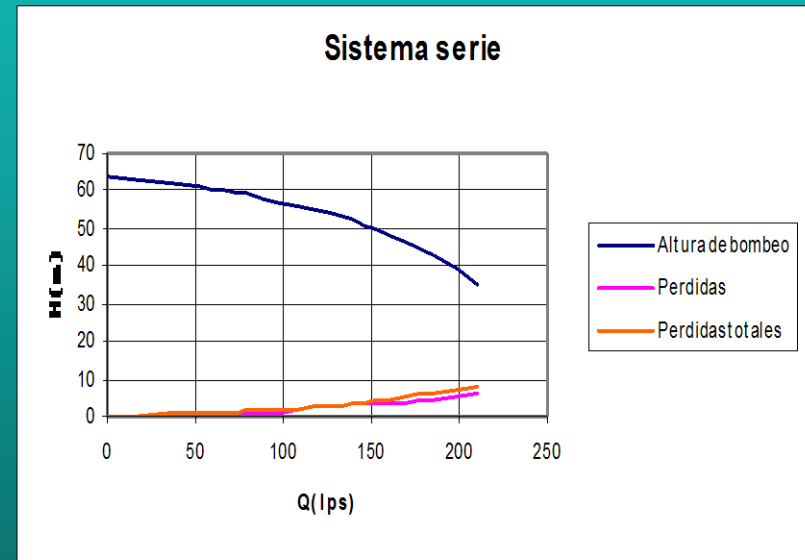
Altura de carga máxímá a la entrada del Rotor

Cuando el sistema opera en serie se obtiene la máxima altura de carga.

La altura de carga se obtiene de restar las pérdidas totales en el sistema a la altura de bombeo.

Altura de carga máxímá:

$$H_{ne-max} = 43 \text{ m.}$$



Velocidad máxima de rotación de las turbinas Michell-Banki

La velocidad de rotación es mayor a medida que la altura de carga la entrada del Rotor sea mayor y a medida que el diámetro exterior del Rotor sea menor. Para propósito de estudio en pequeñas Turbinas, considerando la altura de carga máxima que entrega el sistema de simulación 43 mt y el diámetro mínimo de Rotor a estudiar de 200 mm, se puede lograr una velocidad máxima de acuerdo a la OLADE aproximada de 1350 rpm:

Velocidad máxima: $n=1350$ rpm.

La velocidad mínima con la que puede girar un modelo según la OLADE puede ser de:

Velocidad mínima: $n=150$ rpm.

Torque máximo a ser medido

Para el caso de la prueba con la condición más desfavorable, en la cual se lograría la máxima potencia de la turbina en el ensayo(58 kW), y girando a 150 RPM.

El Torque se obtiene a partir de la ecuación :

$$P_e = T \times n$$

$$P_e = T(N.m) \times n(R.P.M) \times 2 \times \pi / 60$$

$$T = \frac{58000W \times 60}{150rpm \times 2 \times \pi} = 3692N.m = 2723lbf.ft = 32681lbf.in$$

Torque máximo : $T_{\max} = 3692 \text{ N.m.}$

**Rango de Medición de los parámetros
del Banco de Pruebas para Turbinas Hidráulicas**

Parámetro	Magnitud y Unidades		
Caudal mínimo	0,050 m³/s	180 m³/h	793 GPM
Caudal máximo	0,400 m³/s	1440 m³/h	6340 GPM
Altura de carga máxima	43 m	4,3 bar	62 psig
Potencia máxima	58 kW	78 HP	
Torque máximo	3692 N.m	2723 lbf.ft	32680 lbf.in
Velocidad mínima	150 r.p.m		
Velocidad máxima	1346 r.p.m		

Estructuración del sistema de medición

Para el proceso de medición de los parámetros del Banco de Pruebas, tales como : el caudal, la presión, la velocidad de giro, el torque, la potencia. Es necesario evaluar la selección adecuada y el correcto funcionamiento de los elementos que integran el banco de pruebas.

La selección previa de los equipos de medición fue hecha adaptando sus condiciones de operación en función de los rangos de los parámetros a ser medidos en el Banco de Pruebas.

Entre los equipos de medición a seleccionar se consideran:

- ✓ Equipos de Medición de Caudal.
- ✓ Equipos de Medición de Presión.
- ✓ Equipos de Medición de Torque.
- ✓ Equipos de Medición de Velocidad Rotacional.

Equipos de Medición de Caudal

Criterios para la selección del medidor de Caudal

La selección del tipo de medidor de flujo más adecuado para una función particular depende del rango de aplicación y de las siguientes consideraciones:

- a) Costo inicial.
- b) Pérdidas de Presión.
- c) Espacio y montaje para la instalación.
- d) La precisión del medidor de flujo.
- e) Calidad de la calibración.

De los instrumentos mencionados que pueden trabajar en un BPTH no son convenientes los dispositivos que posean las siguientes características:

- ✓ Elevadas pérdidas de Presión.
- ✓ Altos costos(No necesariamente).
- ✓ Medición no lineal.

Guía de Selección

Características Generales de los Medidores de Flujo

TIPO DE MEDIDOR DE FLUJO	Líquidos	Líquidos Viscosos	Fluidos con sólidos en suspensión	Gases	lineal	Capacidad de cobertura	costos	Exactitud en % de la escala completa	Totalizador Indirecto	Pérdida de presión
Placa de Orificio	✓	Limitado		✓	Raíz Cuadrada	4:1	Bajo	1/4 -2	✓	Elevada
Tubo Venturi	✓	Limitado	✓	✓	Raíz Cuadrada	4:1	Elevado	1/4 -3	✓	Media
Tubo Pitot	✓			✓	Raíz Cuadrada	3:1	Bajo	2-5		Limitada
Vertedero	✓	Limitado	Limitado		No Lineal	100:1	Bajo	2-5		Media
Rotámetro	✓	Limitado	Limitado	✓	✓	10:1	Medio	1/2- 2		Fija

MECANISMOS PARA MEDICIÓN DE FLUJO- GUÍA DE SELECCIÓN			
Principio de Operación	Intervalo	Exactitud	Aplicaciones y Observaciones
Medidores Carga Variable - Conducto Cerrado			
<p>Tubo Venturi: productor diferencial perfilado cuyo coeficiente de descarga es prácticamente unitario; el cono de entrada convergente tiene un ángulo de 20° y el cono divergente de descarga tiene 7° para lograr la máxima recuperación de presión. Las tomas de presión están conectadas a los anillos en la entrada y la garganta.</p>	<p>Diámetro de 2 pulgs] y mayores</p>	<p>1 %</p>	<p>Utilizado principalmente para grandes flujos de agua, fluidos de procesos, puede operar con sólidos en suspensión. El Tubo Venturi es costoso en comparación con la tobera de flujo y la placa de orificio. Este dispositivo proporciona las pérdidas de presión mínimas permanente.</p>
<p>Placa de Orificio: el tipo común es el orificio de borde cuadrado situado en una placa delgada. Las conexiones de presión se encuentran en un punto lejano aguas arriba y en el punto de mayor contracción para obtener el máximo diferencial de presión y exactitud.</p>	<p>Muy amplia variedad de tamaños</p>	<p>Alta pero variable</p>	<p>Se usan debido a su simplicidad, bajo costo de fabricación y facilidad de instalación, aunque presentan caídas de presión bastante altas. También producen la pérdida de carga más elevada. La exactitud de la placa depende del cuidado en la construcción, la instalación correcta y coeficientes apropiados para lecturas consistentes. Se requieren materiales con resistencia y espesores adecuados para soportar las presiones de trabajo.</p>

MECANISMOS PARA MEDICIÓN DE FLUJO- GUÍA DE SELECCIÓN

Principio de Operación	Intervalo	Exactitud	Aplicaciones y Observaciones
Medidores Carga Variable - Conducto Cerrado			
<p>Tubo de Pitot: mide la diferencia entre la presión de impacto y la presión estática del fluido que circula por un ducto cerrado. La diferencia de presión estática es proporcional a la carga de velocidad, $V^2/2g$. En consecuencia, proporciona la velocidad del fluido en un punto determinado. Con la velocidad, el caudal del flujo puede calcularse aproximadamente utilizando la velocidad promedio a través del ducto.</p>	Muy amplio	Variable	<p>Mecanismo simple; de fácil instalación y capaz de emplearse en ductos de gran tamaño. Ya que su coeficiente de flujo no puede definirse con exactitud, el instrumento debe calibrarse para la aplicación específica.</p>
<p>Tobera de flujo: tiene una boquilla perfilada insertada en un tubo. No tiene cono de recuperación.</p>	Tamaños moderados	Buena	<p>De mayor costo que las placas con orificio, pero ocasionan menores pérdidas de presión permanentes. Produce una pérdida de carga tan elevada como la placa de orificio. Este dispositivo es menos costoso que el Tubo Venturi.</p>

MECANISMOS PARA MEDICIÓN DE FLUJO- GUÍA DE SELECCIÓN
(continuación)

Principio de Operación	intervalo	Exactitud	Aplicaciones y Observaciones
Medidores de Carga variable - Conducto Abierto			
Vertederos: cualquier obstrucción en un conducto abierto provoca la retención del fluido fluente, en términos de la carga en función del gasto del flujo. Se han desarrollado diversas formas de Vertederos, tales como el de corte en V, cuadrada y trapezoidal.	Muy amplio	Regular. Para mejores resultados se requiere de la calibración.	Se utilizan principalmente para la medición de grandes flujos de agua (tal como en la irrigación), drenaje industrial. Generalmente se construyen en el lugar de su aplicación.
Medidores de área variable			
Rotámetros: se utiliza un flotador de sección transversal creciente hacia arriba y provisto de ranuras inclinadas para inducir la rotación y centrar el flotador en el tubo vertical que sirve de guía. El flujo ascendente provoca que el flotador busque su altura de equilibrio y sea proporcional al flujo. El flotador cambia su posición dentro del tubo proporcionalmente al flujo.	Diámetros de 1/2 a 4 pulgs. (de alta capacidad : 2-12 pulgs)	0,5 - 2%	Se usan los rotámetros de lectura visual en que la posición del flotador se indica en una escala exterior o por transmisión eléctrica. Los flotadores pueden ser afectados por la viscosidad. Los rotámetros de alta capacidad pueden operar con fluidos de alta presión, y reportan lecturas consistentes.

Observaciones del Vertedero

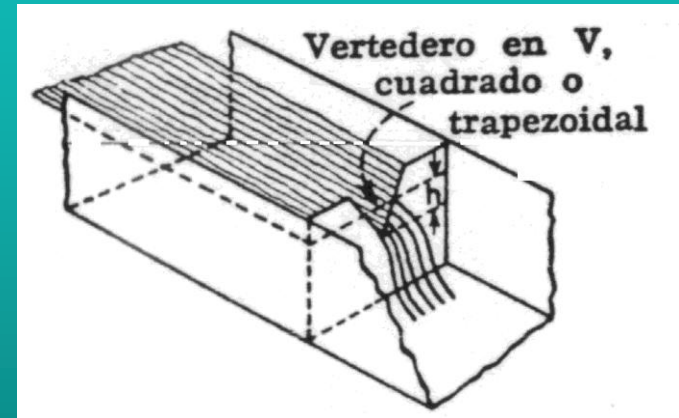
El Vertedero es un elemento limitado debido a que la medición no es lineal. El galpón del BPTH proyectado por EDELCA posee un canal abierto por donde circulara el agua luego que salga de la turbina. El Vertedero se puede adaptar al canal del laboratorio.

El problema es que en el momento de la medición hay que esperar que el flujo se estabilice para proceder a medir el parámetro (altura H) utilizado por este instrumento. Otra desventaja de instalar un Vertedero es que se necesita aireación bajo la vertiente para una medición exacta del flujo.

Por ultimo sería inútil medir caudal que sale de la turbina en caso de que se trabaje con flujo controlado, ya que el flujo derivado se suma al de la turbina y esto es lo que mediría el Vertedero, a menos que la tubería de derivación se rediseñe de tal manera que su descarga sea aguas abajo del Vertedero, lo que implicaría más costos de infraestructura.

Considerando los criterios para la selección del medidor de flujo, en la práctica no debe elegirse el Vertedero porque presenta las siguientes limitaciones:

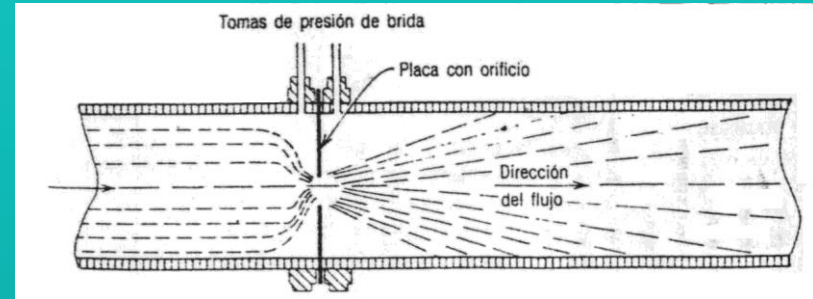
- ✓ La medición no es lineal.
- ✓ Requiere mayores costos de construcción, instalación y mantenimiento.
- ✓ Es limitado para trabajar con fluidos con sólidos en suspensión.
- ✓ Requiere estrictos procedimientos para una alta calidad de calibración.



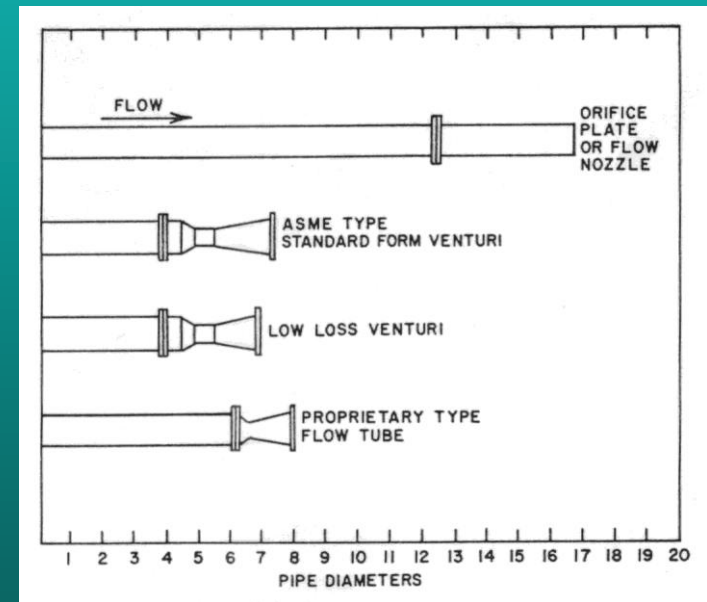
Observaciones de la Placa de Orificio

Según los criterios señalados para la selección del medidor de flujo, particularmente para el Banco de pruebas proyectado no debe elegirse la Placa de Orificio debido fundamentalmente a los siguientes factores:

- ✓ Mayores costos de instalación y espacio porque para el montaje de la Placa de orificio, debe colocarse una sección recta de tubería con longitud de al menos 12 veces el diámetro de tubería aguas arriba.
- ✓ Requiere una mayor cantidad de tubería instalada para mantener condiciones favorables de flujo.
- ✓ Produce una pérdida de carga elevada de la presión diferencial debida a la expansión incontrolada aguas abajo de la placa de orificio.
- ✓ Mayores problemas de alineamiento con la tubería acoplada.
- ✓ Requiere un excelente acabado de los bordes para mejorar el coeficiente de estabilidad.



Sección de una Placa de Orificio concéntrica

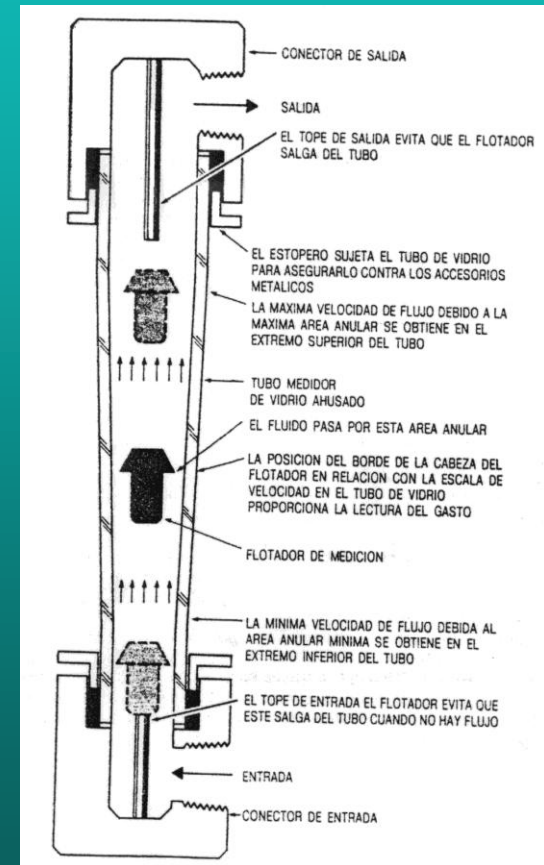


Comparación de longitud de tubería instalada

Ventajas del Rotámetro

El Rotámetro representa una adecuada selección por ser un medidor de flujo que ofrece las siguientes ventajas:

- ✓ **El Rotámetro genera señales lineales; es decir salidas directamente proporcional al flujo.**
- ✓ **En el Rotámetro el flujo puede medirse con precisión hasta aproximadamente un rango de cobertura de 10:1.**
- ✓ **El Rotámetro tiene una exactitud de 0,5 a 2% de la escala completa.**
- ✓ **Su precisión es del orden de 2% de toda la escala cuando esta sin calibrar y de 1% con calibración.**
- ✓ **El Rotámetro presenta una pérdida de presión fija y costos medios.**



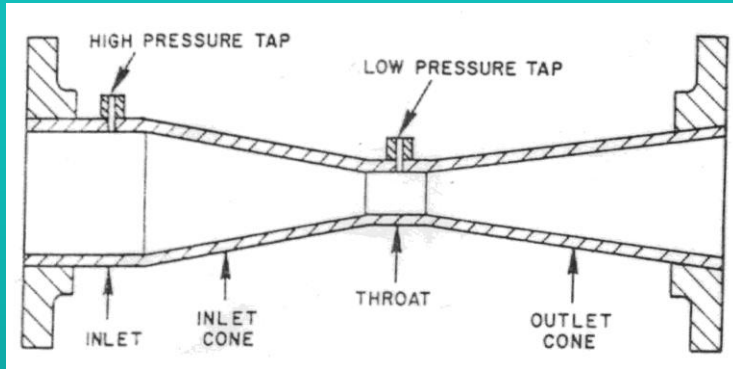
Limitaciones del Rotámetro

Las referencias técnicas del Rotámetro señaladas anteriormente, son válidas pero no son suficientes para plantear su instalación en el caso del Banco de Pruebas proyectado.

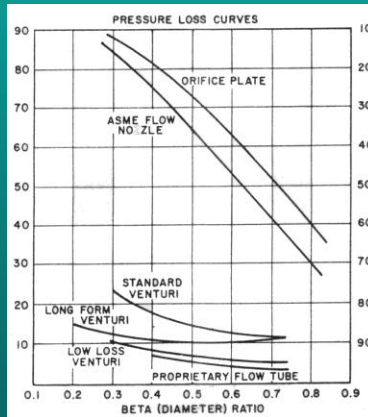
El Rotámetro presenta limitaciones significativas, tales como:

- ✓ Es limitado al manejar fluidos con materiales suspendidos porque produce lecturas erráticas.
- ✓ Los Rotámetros se emplean para medir pequeños caudales; por tanto se requieren hacer cálculos especiales para instalar un instrumento para lograr el máximo caudal ($0,4 \text{ m}^3/\text{s}$) registrado para el banco de pruebas.
- ✓ Mayores costos porque la tubería proyectada de 12 " de diámetro exigiría la aplicación de un Rotámetro de alta capacidad y tamaño para que se ajuste al mayor flujo esperado.
- ✓ Los flotadores pueden ser afectados por fluidos muy viscosos.
- ✓ Los materiales del tubo y del flotador deben satisfacer las condiciones de presión, temperatura y resistencia a la corrosión.
- ✓ Presenta tendencia al envejecimiento y desgaste en los elementos del sistema de movimiento y transmisión eléctrica.
- ✓ Requiere una calibración y configuración especial para las conexiones y ubicación de las tomas del medidor de caudal.

El Tubo Venturi



Tubo Venturi



Pérdida de carga de medidores de Caudal

Las pérdidas de presión en el del Tubo Venturi

El Tubo Venturi tiene el menor porcentaje de pérdida de carga (5 % a 20 %).

La mayor influencia sobre las pérdidas de presión en el Tubo Venturi la ejercen el ángulo de la sección cónica divergente ($7^\circ < \alpha_2 < 15^\circ$), y la relación de diámetro ($\beta = D_g/D_e$).

Es recomendado que el ángulo de divergencia (α_2) sea seleccionado de 7° (grados) para que se genere un mínimo permanente de pérdidas de presión.

Existen otros factores que permiten tener menos pérdidas de presión en el Tubo Venturi, entre los cuales tenemos:

Una alta relación (β) que indica la relación entre el diámetro interno y el diámetro de la garganta del Tubo Venturi.

Una disminución del número de Reynolds (Re).

Una reducción del ángulo de divergencia (α_2).

Las pérdidas de presión son bajas si la rugosidad de la superficie interna se disminuye.

Las pérdidas de presión se disminuyen tanto como sea mejorado el alineamiento con la tubería acoplada.

Ventajas del Tubo Venturi

Para la función que efectuaría el instrumento de medición de caudal en el Banco de Pruebas para turbinas Hidráulicas, se considera que el Tubo Venturi ofrece aceptables ventajas comparativas, tales como:

- ✓ En el Tubo Venturi la pérdida de carga total es baja.
- ✓ Permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 5% a 20% de la presión diferencial.
- ✓ Posee una gran precisión.
- ✓ El Tubo Venturi tiene una exactitud de 1/4 a 3 % de la escala completa.
- ✓ Permite el paso de fluidos con un porcentaje alto de sólidos en suspensión.
- ✓ Ofrecen la característica de autolimpieza debido a sus suaves contornos internos lisos.
- ✓ La forma hidráulica del Tubo Venturi presta mayor confiabilidad dimensional y permite menores pérdidas de presión.
- ✓ Requiere una menor longitud de tubería recta instalada aguas arriba(5,5 veces el diámetro nominal).
- ✓ Las condiciones del régimen de flujo y el rango de caudales de agua que se presentarían en el Banco de pruebas cumplen con las restricciones de diseño del Tubo Venturi.

Limitaciones del Tubo Venturi

Existen importantes para la instalación de un Tubo Venturi:

- ✓ La principal limitación del Tubo Venturi es el costo.
- ✓ Requiere una disposición de tuberías de gran resistencia porque el Tubo Venturi es pesado y voluminoso.
- ✓ Es más difícil la inspección y el mantenimiento debido a su construcción, hay que desmontarlo totalmente del arreglo de tuberías.
- ✓ Se deben aplicar procedimientos precisos de alineamiento con el arreglo de tuberías acoplada para no aumentar las pérdidas de presión.
- ✓ Se debe controlar las condiciones de operación de tal manera que la velocidad del flujo no sean muy altas(mayor a 6 m/s) porque esto causa abrasión y conllevaría al desgaste de la superficie interna del Tubo Venturi.

Selección del medidor de caudal

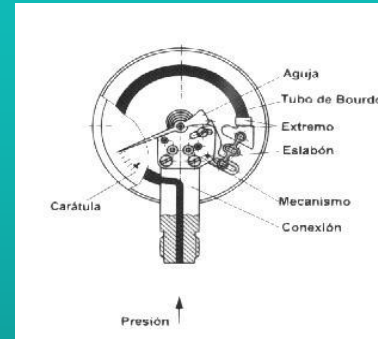
Para determinar cual de los medidores de flujo es factible para integrar el banco de pruebas, como primera opción se escogería un Rotámetro, y como segunda opción se seleccionaría un Tubo Venturi.

En función de los rangos de caudal de agua se consultan las tablas del fabricante para seleccionar el Tubo Venturi como medidor de caudal determinando sus especificaciones de funcionamiento, tamaño, forma y peso.

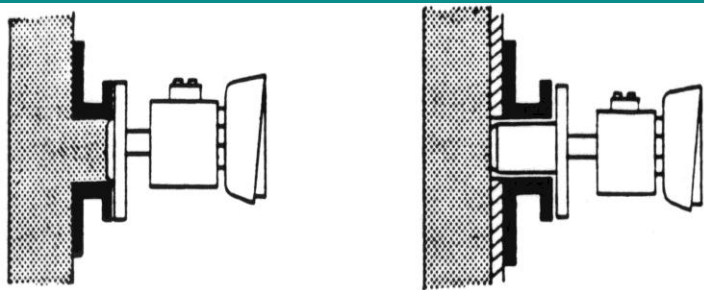
Equipos de medición de Presión

Entre los elementos más empleados para medir presión en los sistemas hidráulicos se encuentran:

- ✓ El manómetro del tipo Tubo de Bourdon.
- ✓ Diafragma y Fuelle.
- ✓ Transductores y Transmisores de presión.



Manómetro de tubo Bourdon

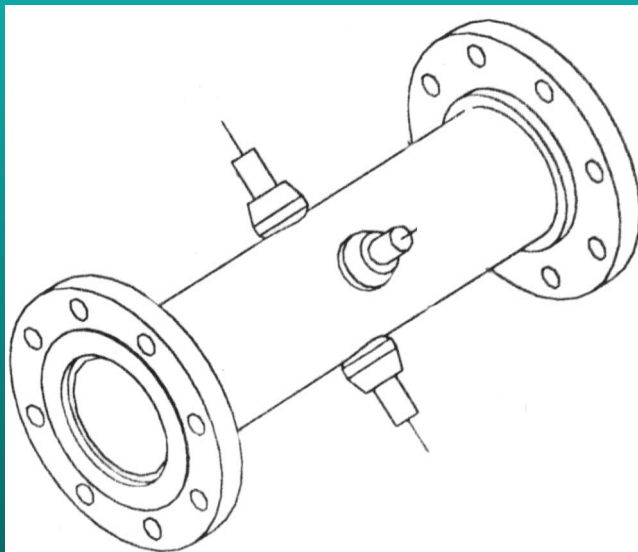


El Diafragma



Transmisor y Transductor de presión

Características generales de Medidores de presión Elementos mecánicos			
Medidor de presión	Campo de medida	Precisión en % en toda la escala	Temperatura máxima de servicio
Tubo Bourdon	0,5-60000 PSI	0,5- 1%	90 °C
Diafragma	0,07- 30 PSI	0,5- 1%	90 °C
Fuelle	0,14- 30 PSI	0,5- 1%	90 °C



Por existir una distribución de velocidades en la tubería, se recomienda entonces medir la presión en cuatro puntos (por debajo, por arriba, por los lados) de la tubería.

Para esto debe construirse un pequeño tramo de tubería que permita disponer una especie de anillo piezométrico, el cual permite obtener un promedio de la presión estática en la pared de la tubería.

Vista isométrica del anillo piezométrico

Criterios para la selección del medidor de presión

Para asegurar la selección del medidor de presión, es importante tener en cuenta los siguientes factores para obtener seguridad y precisión:

- ✓ **Composición del fluido.**
- ✓ **Temperatura del fluido.**
- ✓ **Condiciones ambientales.**
- ✓ **Rango de presión.**
- ✓ **Costo inicial.**
- ✓ **Método de instalación.**
- ✓ **Procedimiento de calibración.**
- ✓ **Precisión requerida.**
- ✓ **Condiciones que afectan el uso del sistema.**

Existen algunas limitaciones para la instalación de manómetros:

- ✓ **Los manómetros deben instalarse en la posición hacia arriba.**
- ✓ **Por condiciones de operación en la tubería se requiere la construcción física de un arreglo con 4 tomas de presión, entonces sería necesario otros accesorios para las aplicaciones en que el manómetro se monta lateral como horizontal o hacia abajo.**
- ✓ **Estos inconvenientes arrojarían más costos para el montaje de los manómetros.**
- ✓ **La lectura de presión se efectuaría en el sitio de colocación del manómetro lo cual no es conveniente porque para el banco se estima la instalación de un tablero de lectura de datos. se requiere obtener un promedio de la presión estática y llevar la señal a una instalación remota .**

Selección de Transductores y transmisores de presión

De acuerdo a las referencias técnicas de los transmisores y transductores, se plantea su selección por las ventajas que ofrecen en su instalación para el Banco de Pruebas proyectado.

- ✓ Los transmisores y transductores pueden justificar los requisitos de precio por su excelente funcionamiento.
- ✓ Se caracterizan por dar una señal de salida estable que logra obtener una lectura precisa de la presión en el punto de medición. Logran una precisión menor a 0,5% de alcance (span).
- ✓ Generan señales lineales porque la salida de corriente y voltaje están estandarizadas en una escala directamente proporcional a la presión aplicada.
- ✓ Presentan mayor confiabilidad en los circuitos de voltaje y de salida de corriente. Los sistemas de cables están protegidos de interferencias electromagnéticas.
- ✓ Por su diseño compacto dentro de una caja de acero inoxidable, el paquete sensor ofrece un alto rendimiento, excelente resistencia contra la vibración y larga vida útil.

Selección de Transductores y transmisores de presión

- ✓ Los transmisores y transductores se suministran con una caja, la conexión del proceso y conexiones codificadas con colores, se usan en control de procesos y para mediciones de presión donde se desea una lectura en un área remota con respecto al punto de medición.
- ✓ Emplear transmisores y transductores de presión en el BPTH proyectado por la empresa es lo ideal, ya que se adaptan a la estructura del banco de pruebas. Se necesita que la señal se lea en un panel digital en una sala del Laboratorio de Microcentrales que se encuentra alejada de las tuberías del sistema de simulación.
- ✓ De acuerdo a la información de los modelos de medidores de presión analizados, como primera opción se seleccionarían los transmisores y transductores, y como segunda opción se escogerían los manómetros para las aplicaciones hidráulicas en el banco de pruebas.

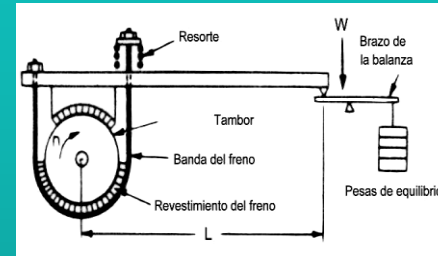
Criterios de selección del medidor de torque y Potencia

Estos equipos comúnmente son conocidos como frenos, y en la actualidad las pruebas del par de torsión pueden realizarse con diversos equipos. Estos frenos se clasifican en:

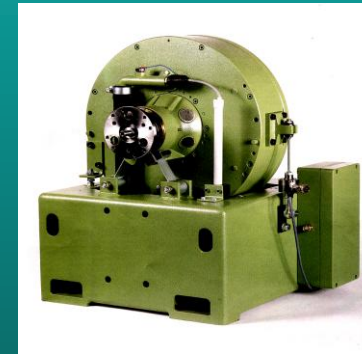
- ✓ Freno Prony o freno de bandas
- ✓ Freno hidraulico
- ✓ Freno Dinamométrico de corrientes parásitas

Para la selección del medidor de Torque se consideran los siguientes factores:

- ✓ El costo inicial.
- ✓ La precisión requerida.
- ✓ La tecnología.
- ✓ La instalación y el montaje.
- ✓ La operación y el mantenimiento.
- ✓ El sistema de enfriamiento.



Freno Prony



Freno dinamométrico de corrientes parásitas

Ventajas y desventajas del Freno Prony

El freno Prony ofrece las siguientes ventajas:

- ✓ **El freno Prony es de bajo costo.**
- ✓ **Esta integrado por pocos componentes y partes mecánicas.**
- ✓ **Requiere poco mantenimiento.**

El freno Prony tiene algunas desventajas:

- ✓ **La tecnología se considera obsoleta.**
- ✓ **El freno Prony requiere un excesivo consumo de agua refrigerante para disipar el calor generado en el tambor para evitar su rotura y el desgaste de las bandas.**
- ✓ **Las mediciones en el freno Prony hay que hacerlas paso a paso, y no miden las r.m.p.**
- ✓ **Presenta dificultades en lo que respecta a su ajuste y al mantenimiento de una carga específica.**
- ✓ **Es un instrumento de baja precisión por lo que requiere cuidado para estimar las medidas de torque y potencia obtenidas.**

Ventajas del Freno Dinamométrico

El freno dinamométrico de corrientes parásitas tiene las siguientes ventajas:

- ✓ **La medición del torque se genera con alta linealidad.**
- ✓ **Indicación directa del torque de freno en la unidad de control.**
- ✓ **Posee dispositivos de control que pueden registrar las rpm del eje y entrega mediciones directas de Torque y de Potencia.**
- ✓ **Son diseñados para ensayar equipos rotativos sobre un amplio rango de potencia.**
- ✓ **Amplio rango de operación con altos torques a bajas velocidades de giro y bajos torques a carga mínima.**
- ✓ **A un freno dinamométrico de poco tamaño puede acoplarse un prototipo con alta potencia a bajas velocidades, y correspondientemente a baja potencia a altas velocidades.**
- ✓ **Puede operar en ambas direcciones de rotación sin ninguna reducción de funcionamiento.**
- ✓ **Tienen una operación libre de vibraciones y bajo nivel de ruido sobre todo el rango de velocidades.**
- ✓ **No hay influencia en la operación debido a cambios de presión en el suministro del agua de enfriamiento.**
- ✓ **El freno de corrientes parásitas tiene un funcionamiento automatizado y altamente confiable.**

Desventajas del Freno Dinamométrico

El Freno Dinamométrico de corrientes parásitas presenta significativas limitaciones:

- ✓ **El freno dinamométrico es de un costo elevado.**
- ✓ **El freno dinamométrico posee una tecnología avanzada y sofisticada que requiere un especial cuidado en la operación y el mantenimiento.**
- ✓ **El freno dinamométrico requiere de una alimentación eléctrica con una potencia de entrada igual o mayor que la que el freno disipara.**
- ✓ **El freno dinamométrico requiere la instalación y montaje en una base con soportes especiales.**
- ✓ **El freno dinamométrico requiere el diseño de un sistema de enfriamiento lo cual representa un incremento de los costos.**

Selección del Freno Dinamométrico

La medición del torque y la potencia son parámetros fundamentales en el proceso de ensayos de turbinas dentro del banco de pruebas. El equipo de medición torque o Freno debe cumplir con las necesidades básicas de precisión y seguridad.

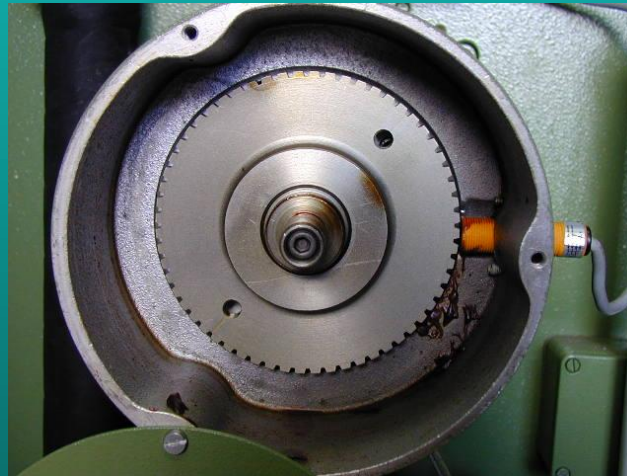
Para la selección del medidor de torque y potencia se debe considerar si se dispone de capital suficiente para hacer la inversión en los accesorios con la tecnología adecuada para que el freno dinamométrico sea confiable .

Por estas razones está descartado el Freno Prony, el cual sería comparativamente de bajo costo; pero no ofrece las características para el monitoreo y control de las variables del proceso dentro del banco de pruebas.

De acuerdo a la información técnica suministrada se recomienda la selección de un Freno Dinamométrico de corrientes parásitas. El Freno dinamométrico dispone de una celda de carga para medir el torque y un dispositivo para medir la velocidad.

Selección del Medidor de Velocidad

El Freno Dinamométrico de corrientes parásitas tiene la ventaja de poseer el dispositivo de medición de velocidad rotacional, el cual funciona con un transductor de pulso que detecta los pulsos sobre un disco montado en una brida acoplada al elemento giratorio. La señal de velocidad es convertida en una señal de voltaje. Este voltaje es usado para la indicación digital de la velocidad y el control de la velocidad por medio de la unidad de control integrada al freno.



Medidor de velocidad rotacional

Listado de componentes iniciales del Sistema de Medición

#cantidad	Componente	modelo	Fabricante
1	Freno Dinamometrico	Eddy-current dynamometer Type W 130 Kw with control system (serie 2000 D/W)	Schenk Serial N° LWG 1543
1	Tubo Venturi 12" ϕ	BR- 27750-72-61	
1	<u>Torquimetro</u>	MCRT 17-02T (25-3) 25000 Lb-in NON-CONTACT	<u>Himmelstein</u>
1	<u>Módulo programmable System 6</u>	6-488 B	<u>Himmelstein</u>
1	Módulo para medición de caudal	6- 138	<u>Himmelstein</u>
1	Módulo para medición de velocidad	6-562 A	<u>Himmelstein</u>

Listado de componentes propuesto para el Sistema de Medición

#cantidad	Componente	modelo	Fabricante
1	Freno Dinamometrico (Potencia) Tacometro (rpm) Celda de carga (torque)	Eddy-current dynamometer Type W 130 Kw with control Unit (serie 2000 D/W)	Schenk Serial N° LWG 1543
1	Tubo Venturi 12" ϕ	BR- 27750-72-61	
4	Transmisor de presión	Modelo 891.14.540 Rango de presión 0-100 PSIG	Wika
1	Módulo programmable System 6	6-488 B	Himmelstein
1	Módulo para medición de caudal	6- 138	Himmelstein
1	Módulo para medición de velocidad	6-562 A	Himmelstein
1	Medidor digital programable	907.50.9x0	Wika
1	Transmisor de diferencial de presión	Delta- Trans Model 891.34.2189	Wika

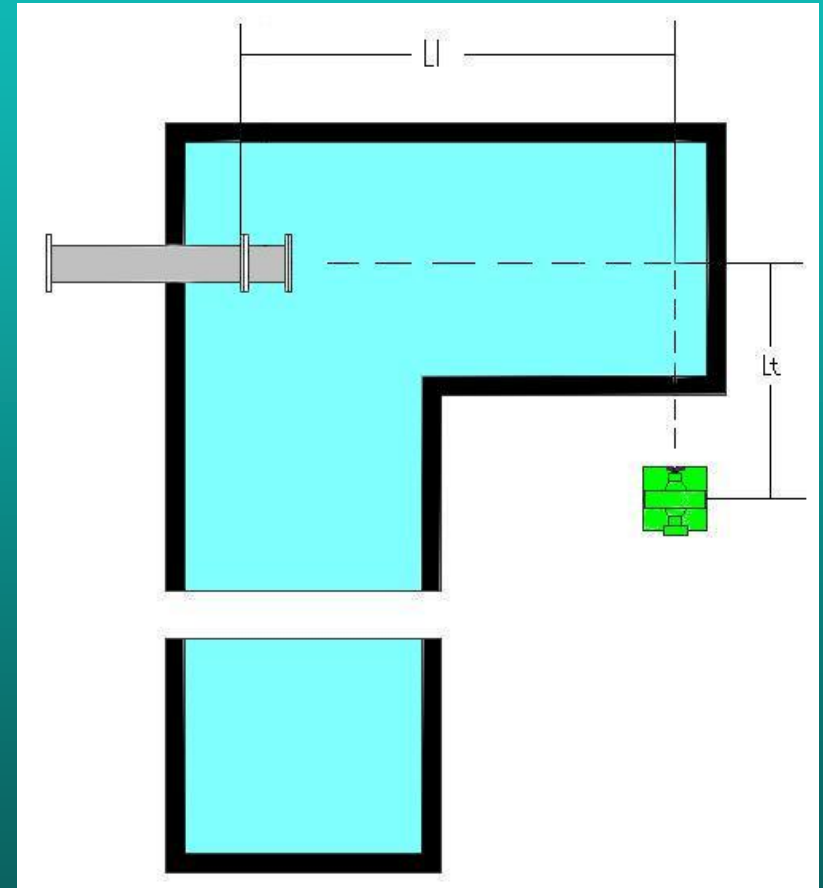
Instalación de equipos de medición propuestos.



Ubicación del Freno dinamométrico

Según el fabricante del Freno Dinamométrico, el equipo debe estar fijo anclado a una base, lo cual limita, por tanto, la flexibilidad para el traslado y rotación cuando se quiera probar distintos tipos de Turbinas Hidráulicas.

Esto obligó a proyectar la mejor ubicación del freno de manera tal que se pueda utilizar la mayor cantidad de condiciones hidráulicas que entrega el sistema de simulación

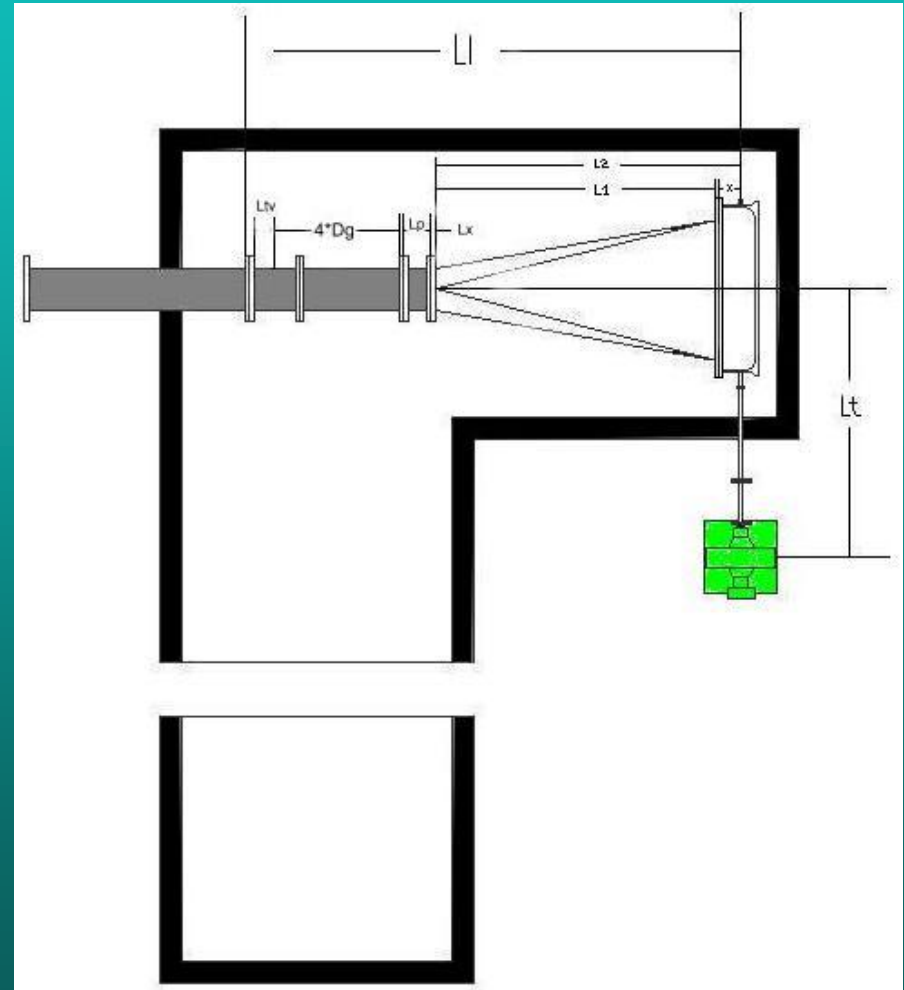


Ubicación del Freno dinamométrico (Posicionamiento Longitudinal)

Para el calculo de esta distancia (Ll) se tomo en consideración los elementos que preceden a la turbina Michell-Banki. Se estimaron longitudes, se utilizo tablas de la OLADE para estimar longitudes de la turbina Banki, Normas AWWA e ISO para las longitudes concernientes a tramos de tuberías y bridas.

$$Ll=3550\text{mm}$$

Para esta longitud se comprobó que se pudiera usar el máximo de condiciones hidráulicas que puede entregar el sistema de simulación cuando se ensaye una Turbina Banki.



Ubicación del Freno dinamométrico (Posicionamiento Transversal)

Para el calculo de esta distancia (L_t) se toma como criterio el ancho del pozo (L_{t1}) y la longitud necesaria para los acoplamiento entre el freno y la turbina Michell-Banki (L_{t2}).

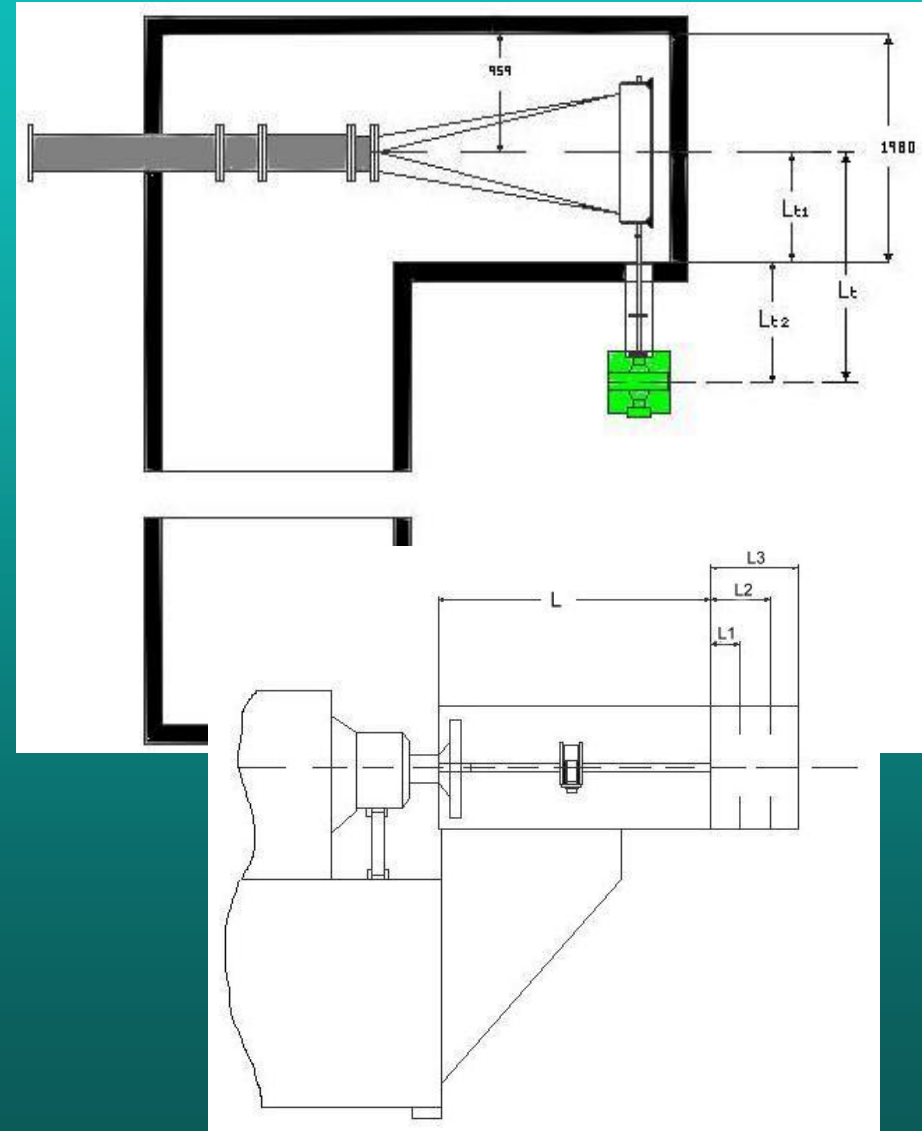
Para la longitud L_{t2} se consideró la longitud de la caja protectora que recomienda el fabricante para el acoplamiento flexible del freno con el equipo a unir.

$L_{t1}=931\text{mm}$

De los datos del manual del freno las dimensiones mostradas en la figura suman:

$L_{t2}=754\text{mm}$

Por lo tanto $L_t=1775\text{mm}$

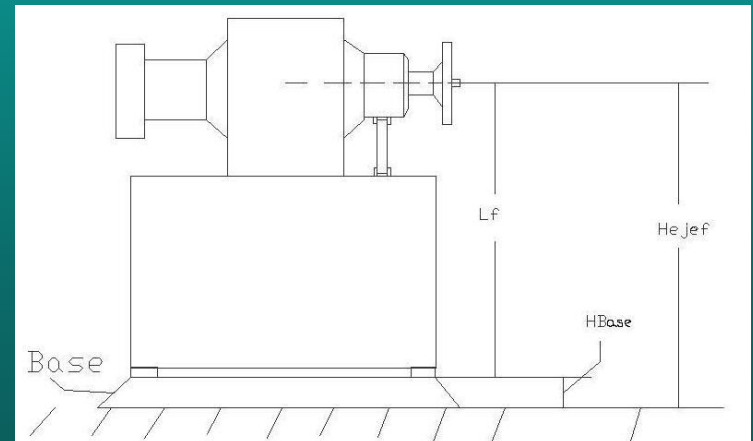
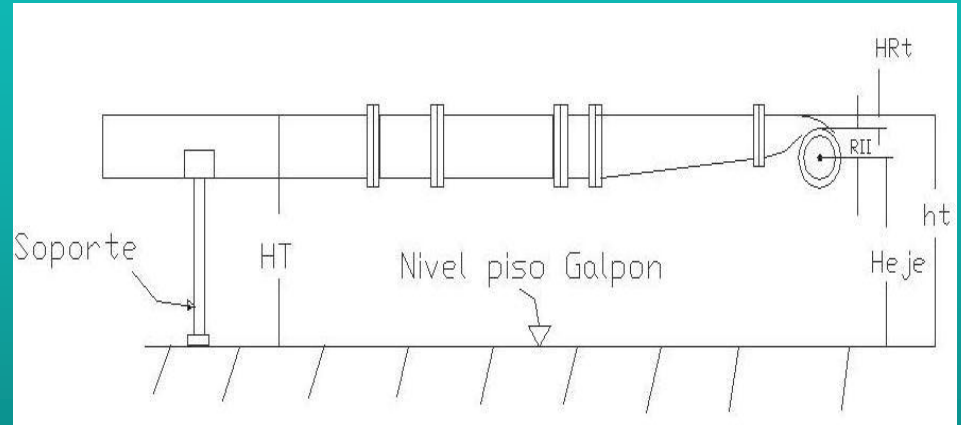


Ubicación del Freno dinamométrico (Altura sobre el nivel del piso del laboratorio)

La altura a colocar el freno sobre el galpón depende directamente de la altura que tenga el eje del modelo de turbina Banki (Hejef). Esta altura debe ser fija ya que el freno no se puede subir o bajar. En todo caso el modelo de turbina y el conjunto de tuberías que la preceden se deben diseñar de tal manera que la altura del eje de la turbina (Heje) sea igual a la altura del eje del freno (Hejef).

Esta altura depende de los siguientes parámetros:

- ✓ Altura de tubería del tramo final del sistema de simulación (H_T).
- ✓ Diámetro exterior del rotor (D_{eR})
- ✓ Longitudes predefinidas del Freno Dinamométrico.



Ubicación del Freno dinamométrico (Altura sobre el nivel del piso del laboratorio)

La altura H_T debe ser lo mas constante posible en el distribuidor de la turbina Michell-Banki, para evitar así mayores perdidas de carga y disminuir la turbulencia del fluido a la salida del distribuidor.

La altura $Heje$ se obtiene

$$Heje = HT - HRt - R_{II}$$

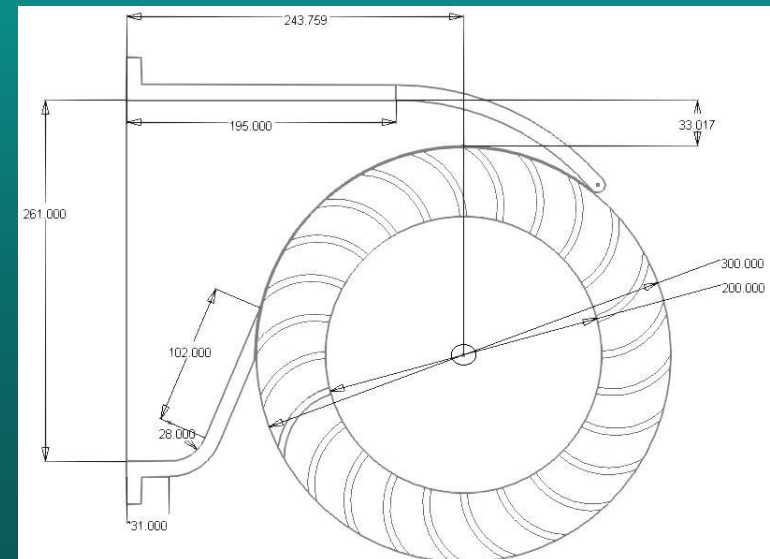
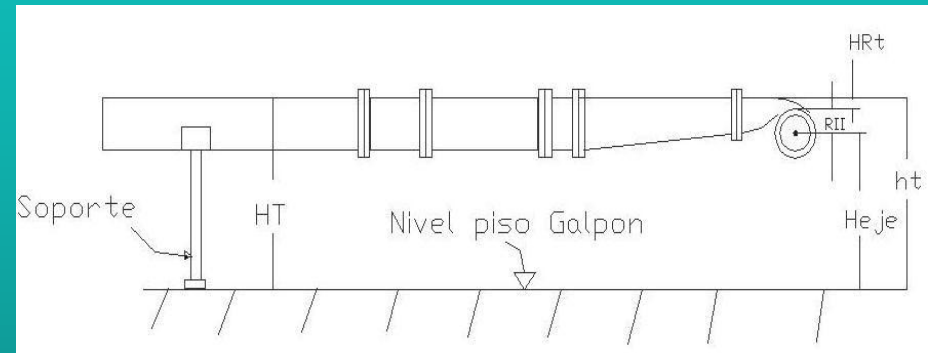
Para el caso mas desfavorable un $Der=300mm$
Se dibujo una vista del modelo de la OLADE y se obtubieron las medidas.

$HRt=33mm$

$R_{II}=151mm$

Conociendo $HT=760mm$

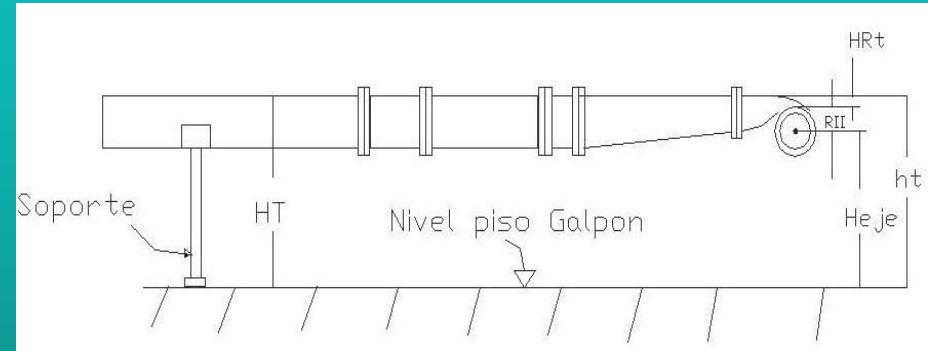
$$Heje = 760 - 33 - 151 = 576mm$$



Ubicación del Freno dinamométrico (Altura sobre el nivel del piso del laboratorio)

La altura a la que deberá estar el freno sobre el nivel del piso debe ser la misma altura de la base, luego:

$$H_{\text{Base}} = H_{\text{eje}_f} - h_F$$

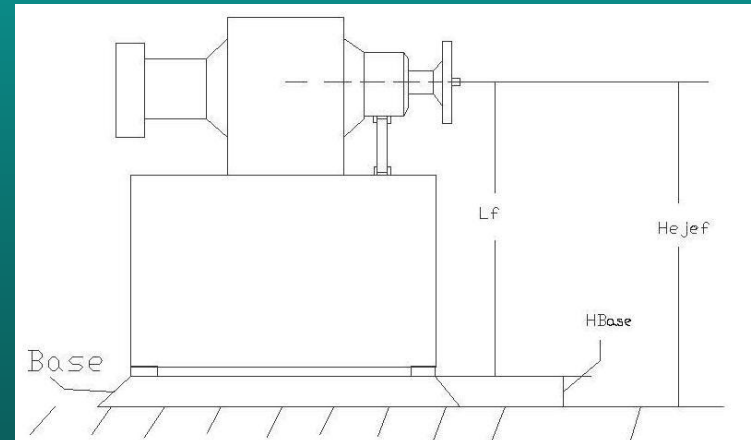


Del manual del freno se concluye que:

$h_f = 500\text{mm}$

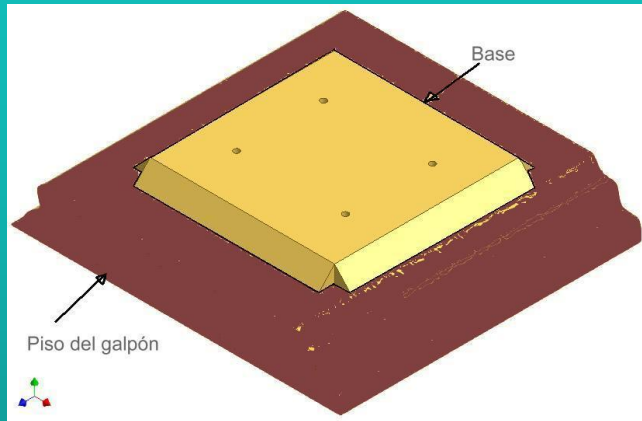
Y por tanto la altura que debería tener la base es:

$$H_B = 576 - 500 = 76\text{mm}$$



Selección de la base-soporte

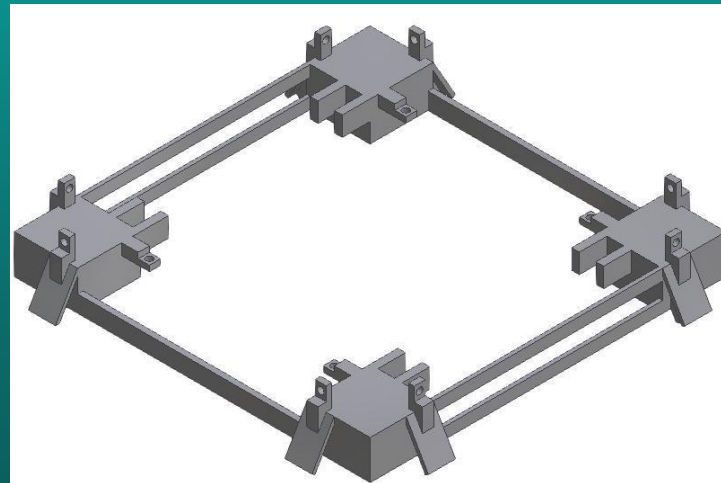
Se presentaron tres propuestas de base que se adaptaran al freno



Modelo de base "A"



Modelo de base "B"



Modelo de base "C"

Selección de la base-soporte

Las características que debe tener la base a elegir son las siguientes:

- ✓ La altura de la misma debe ser de 76mm.
- ✓ Debe soportar los esfuerzos debido al peso del freno más los demás accesorios.
- ✓ Soportar y disminuir las vibraciones que se puedan producir en el Freno Dinamométrico.
- ✓ Deberá tener la facilidad para el desmontaje del Freno dinamométrico para el caso de mantenimiento.
- ✓ Deben tener flexibilidad para poder alinear el equipo con la Turbina .

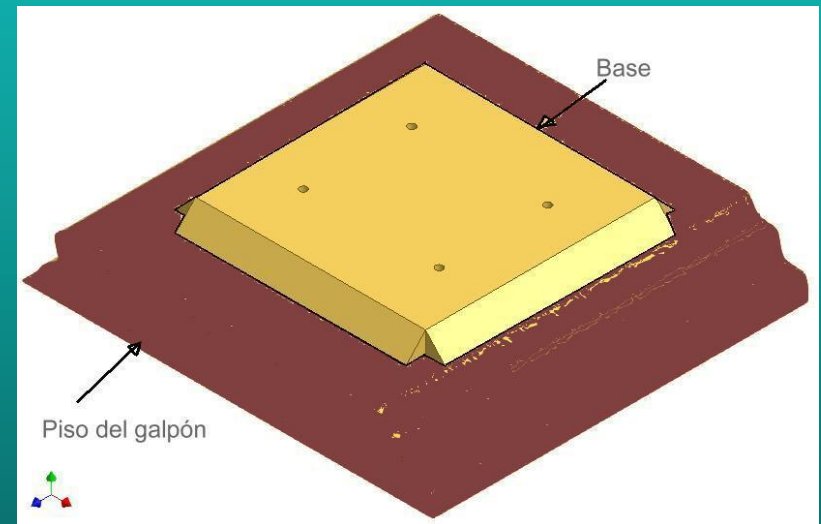
Selección de la base-soporte

El primer modelo (modelo A) es una base de concreto, a la cual se le ancla el freno por medio de los cuatro tornillos que el freno posee en sus esquinas.

Los tornillos en este caso no se anclan directamente al concreto, si no a un cilindro metálico que esta anclado al piso del galpón y la base, y tiene una profundidad de 25cm.

La ventaja de este modelo de base es la facilidad de construcción, para evitar las vibraciones se puede colocar una especie de resina epóxica que se encuentre entre la superficie de la base y la de contacto del freno, para el caso de a alineación se puede optar por pequeñas laminas de acero delgadas las cuales se colocarían entre la resina y la superficie de contacto del freno.

Esta base presenta la desventaja de un complicado desmontaje del freno a la hora del mantenimiento aunque no es un impedimento mayor.



Selección de la base-soporte

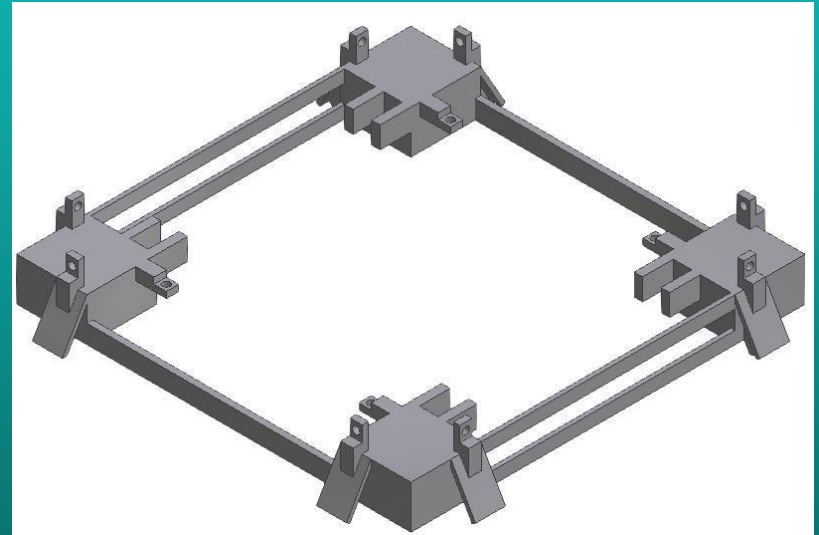
El modelo de base B es una base de metal, la cual esta enrasada al piso del galpón, al igual que el caso anterior los tornillos del freno son los sujetadores principales del mismo. Esta base presenta la ventaja de facilitar el desmontaje del freno en el caso mantenimiento, además de ser de fácil construcción, la cual puede ser llevada a cabo en los talleres de la empresa EDELCA.



Selección de la base-soporte

El modelo de base C es un modelo de Base Soporte utilizado en algunos equipos rotativos de la Microcentral Canaima de la empresa EDELCA. Esta base es metálica y debe estar anclada o empotrada al piso del galpón. Esta base está construida por soldadura de perfiles de acero y piezas metálicas en forma de pata de gallina para unir los perfiles y apernar El equipo a una lamina de acero.

Esta Base de acero presenta la ventaja del facilitar el procedimiento de alineación mediante los tornillos de ajustes laterales, la construcción es igualmente fácil ya que la empresa tiene experiencia en la fabricación en tipo de bases.

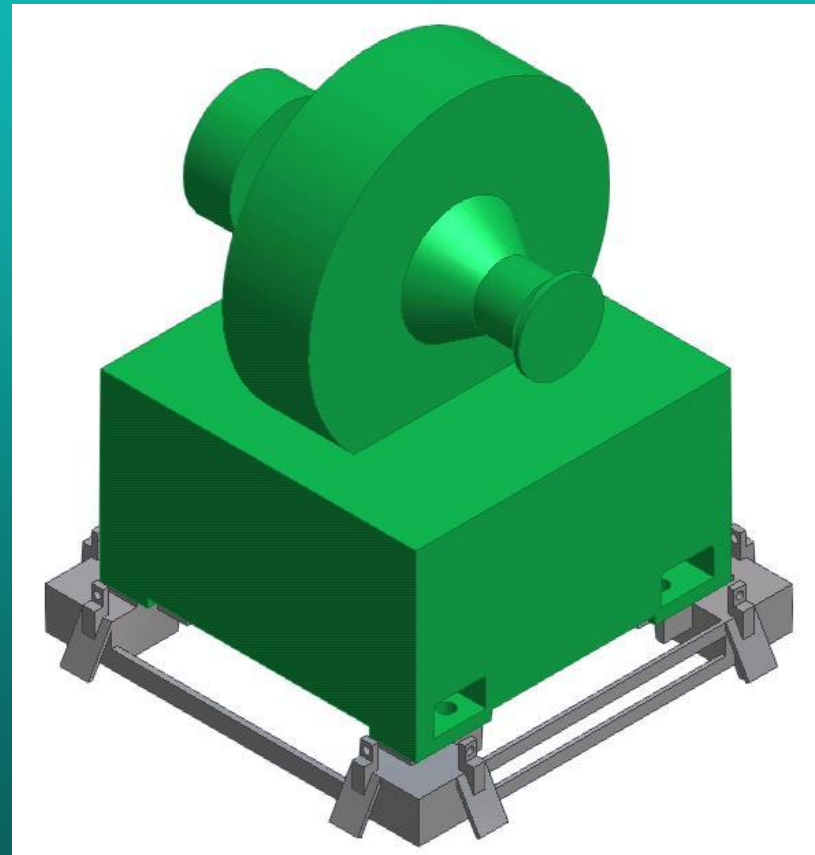


Selección de la base-soporte

De estos tres tipos de base se selecciona la base modelo “C”.

Esta base presenta las ventajas expuestas para la alineación y mantenimiento de los equipos sobre este tipo de bases es conocido con amplia experiencia por la empresa.

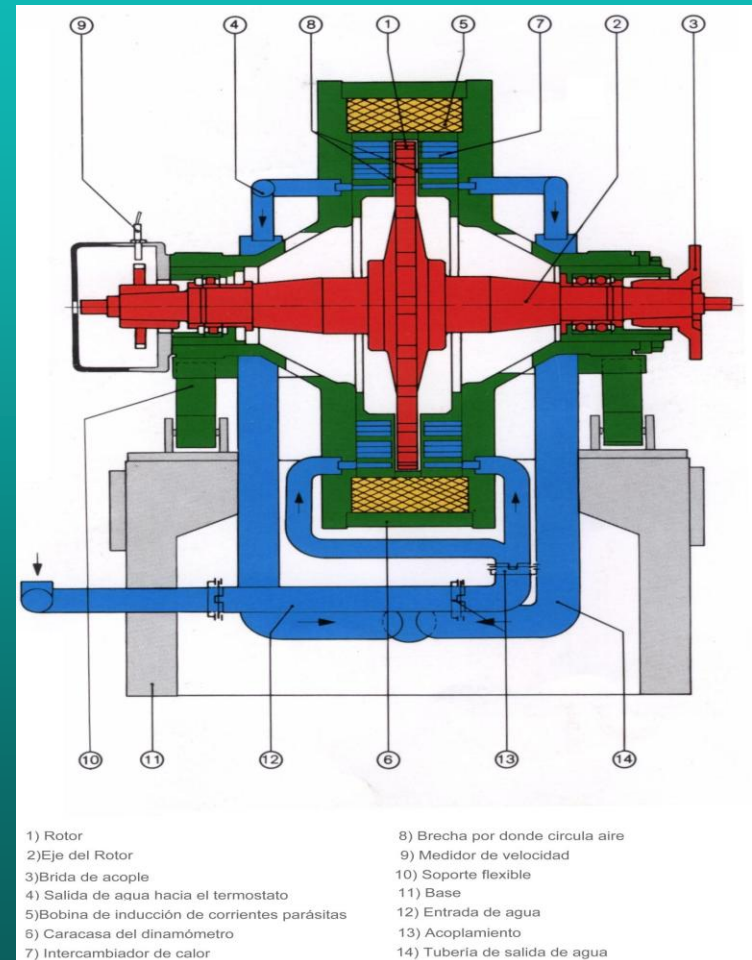
Tampoco existe problema de desacoplamiento del freno de la misma en labores de mantenimiento, ya que en el galpón donde se ubicará el BPTH, existe una grúa puente y señorita de 5 toneladas, que puede desmontar el freno de la base levantando el equipo hacia arriba, y simplemente desajustando los tornillos de sujeción y de alineación.



Sistema de Enfriamiento para el freno Dinamométrico

Según el manual del Freno Dinamométrico de corrientes de Eddy W 130, el sistema de refrigeración a usar en el mismo deberá tener como fluido de trabajo agua, la misma debe contar con ciertas características .

En cuanto a la cantidad de agua según el manual del freno, indica tener un caudal máximo de 1,1 Lt/s para una temperatura de entrada de 30 °C cuando se esta trabajando con la potencia máxima de prueba de 130 KW.



**AGUA DE ENFRIAMIENTO
DEL FRENO DYNAMOMETER SCHENCK W130
RANGO DE VALORES PERMISIBLES**

Parámetro	Unidades	Flujo simple	Circulación
Valor pH	-	7,2 – 9,5	7,2 – 9,5
Dureza total	mg/l	< 537	< 716
Dureza Carbonatos	mg/l	< 179	< 89,5
CO ₂	mg/l	< 20	< 3
Dureza No carbonatos	mg/l	< 501	< 627
Contenido de sales	mg/l	< 1200	< 1200
SO ₄ ²⁻	mg/l	< 15	< 150
Cl ⁻	mg/l	< 150	< 150
NO ₃ ⁻	mg/l	< 50	< 50
NH ₄ ⁺	mg/l	< 5	< 5
Hierro Fe	mg/l	< 1,0	< 1,0
Mn	mg/l	< 0,15	< 0,15
Aceite	mg/l	0	0
Crecimiento de algas	-	No permitida	No permitida

Sistema de enfriamiento para el freno dinamométrico

El Dpto. de Gestión Ambiental de EDELCA suministro un informe anexo con las propiedades del agua del embalse Macagua, que es la misma a utilizar en el banco de pruebas y para la refrigeración del freno.

A continuación comparando este informe con los datos del manual del freno, el agua no cumple con todas los requerimientos exigidos por el freno; podemos señalar por ejemplo, el valor de pH= 6,3 es menor al del rango permisible para la operación del sistema de enfriamiento del freno (7,2 – 9,5).

Para poder cumplir con estos requisitos el agua debe ser tratada antes de entrar en el sistema de enfriamiento.

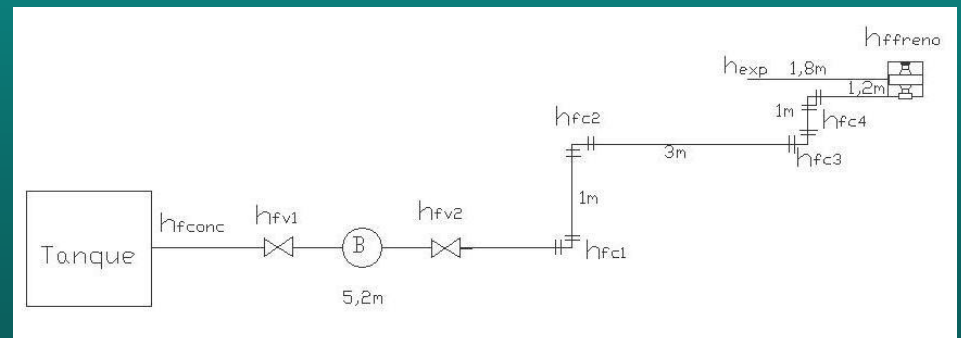
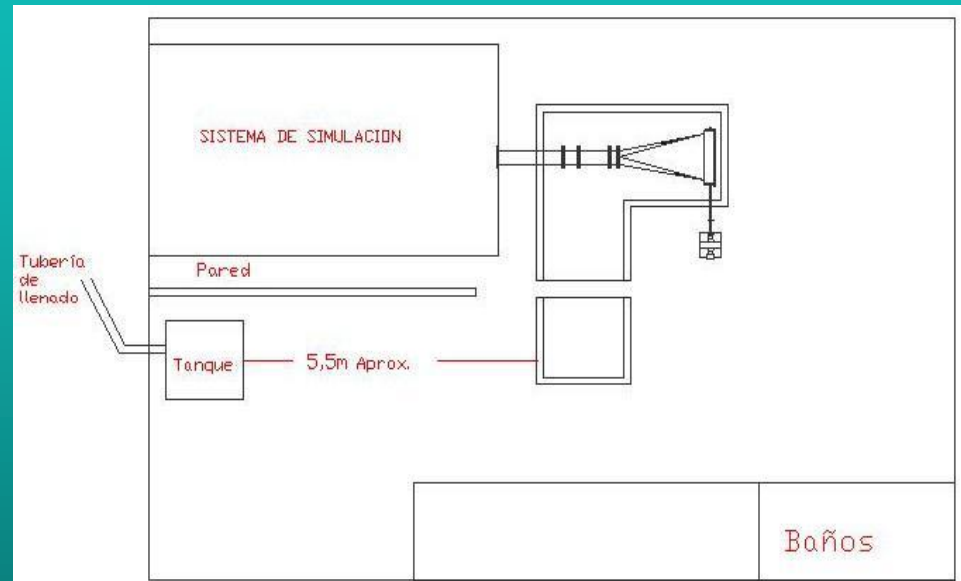
Se seleccionó un sistema abierto de refrigeración para el freno ya que es el que garantiza que no haya recirculación de agua evitando así que entren al freno partículas metálicas que se desprenden con la corrosión.

Sistema de enfriamiento para el freno Dinamométrico

Por tal motivo se proyectó un tanque de almacenamiento de agua de caras cuadradas con un volúmen de $3,6\text{m}^3$.

Este tanque se ubico en la parte trasera del laboratorio.

Con las medidas del laboratorio se diseño un pequeño sistema de bombeo de agua desde el tanque hacia el freno, que supliera el caudal requerido, el sistema esta conformado por tubería de 1/2 pulg, una bomba de $\frac{3}{4}$ HP o on poco mayor.

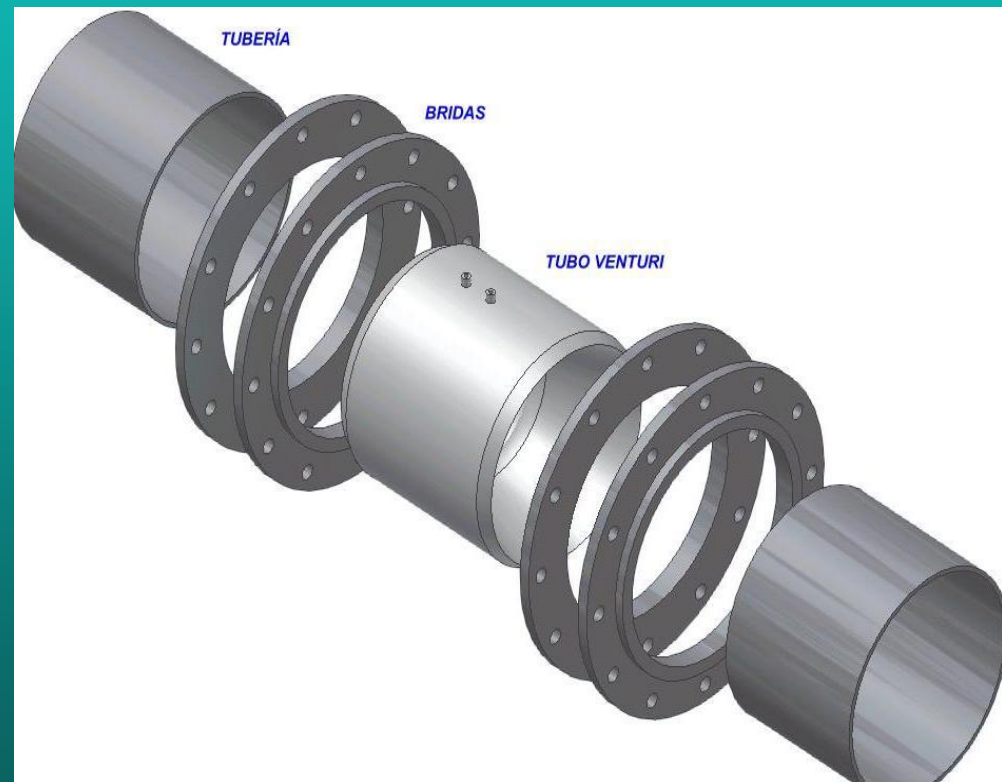


Ubicación y montaje del Tubo Venturi

Para la instalación del Tubo Venturi seleccionado modelo BR27750-72-61 con el sistema de tubería del BPTH se requiere una soldadura a tope directo a la tubería o un arreglo de bridas. Por razones de alineamiento y para facilitar el montaje y el mantenimiento se recomienda el arreglo de bridas en los extremos del tubo Venturi. Las Bidas se soldarán al Tubo Venturi y así efectuar el montaje con la tubería de 12 “ según el procedimiento de atornillado de bridas descrito por las normas AWWA.

Las bridas específicas para el tubo Venturi de 12 pulg de diámetro, tienen como longitud 31,75mm (1,25pulg) y un diámetro de 482,6mm (19pulg),

Pernos 0,875 pulg.

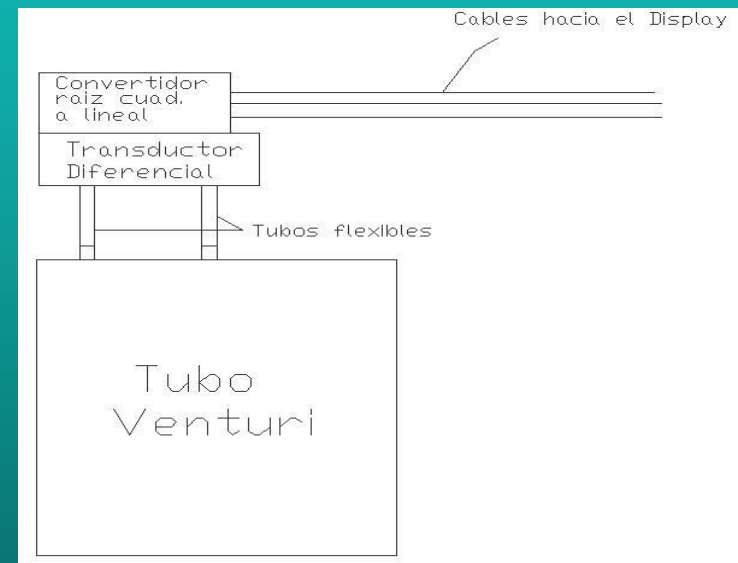


Montaje del Tubo Venturi

Equipos auxiliares del Tubo Venturi

Para la facilidad en las lectura del caudal del BPTH, el tubo Tubo Venturi seleccionado se le agregará un transductor diferencial de presión en las dos tomas de presión que dispone el Tubo Venturi. A continuación a este transductor se le colocará un convertidor de raíz cuadrada a lineal.

El transductor que seleccione la empresa deberá soportar pequeñas vibraciones que se puedan producir durante la operación del BPTH. En los anexos hay una recomendación de un transductor diferencial de presión el cual opera con los rangos de caudal del BPTH.

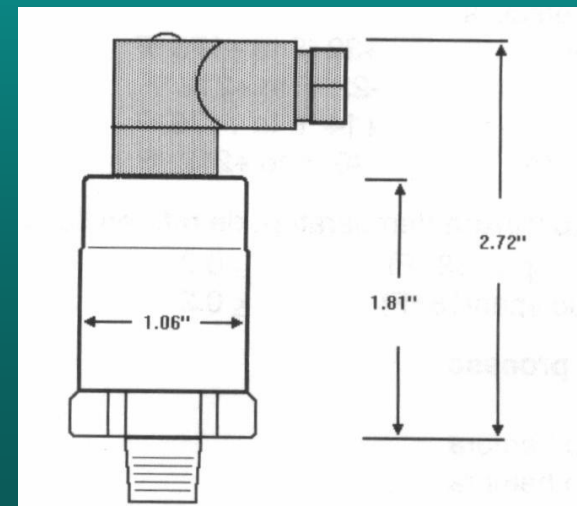
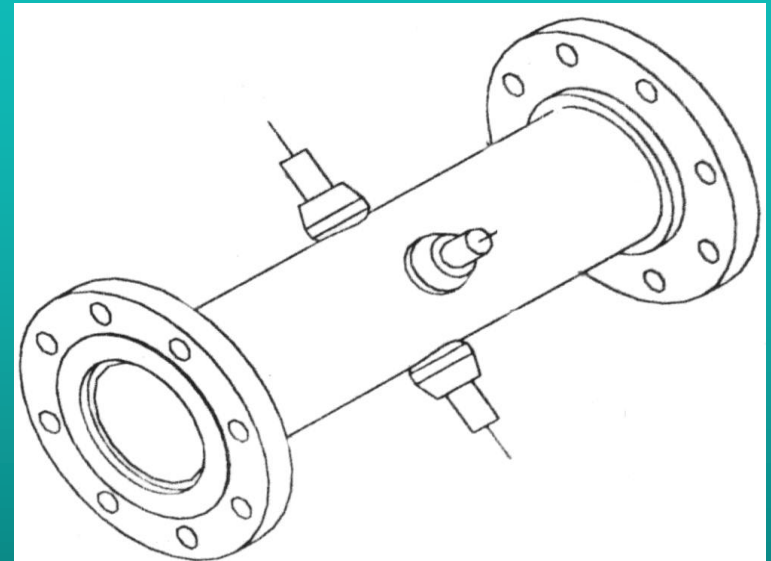


Sistema de medición de presión

El anillo piezométrico se proyecta a una distancia aguas abajo del Tubo Venturi igual a cuatro veces el diámetro de garganta del Tubo Venturi.

El anillo debe tener al igual que la tubería un diámetro interno 12 pulg. Para una mayor certeza en las mediciones, en este anillo se alojarán cuatro transductores de presión, esto se debe a que la tubería por ser tan grande la distribución de velocidades dentro de la misma no es uniforme y por consiguiente la de distribución presión tampoco, luego para una mejor medición se deben colocar medidores de presión a los lados uno arriba y uno abajo y sacar el promedio de las mediciones.

El transductor recomendado es el modelo 891-14-540 de la empresa WIKA con rango de presión de 0-100psig



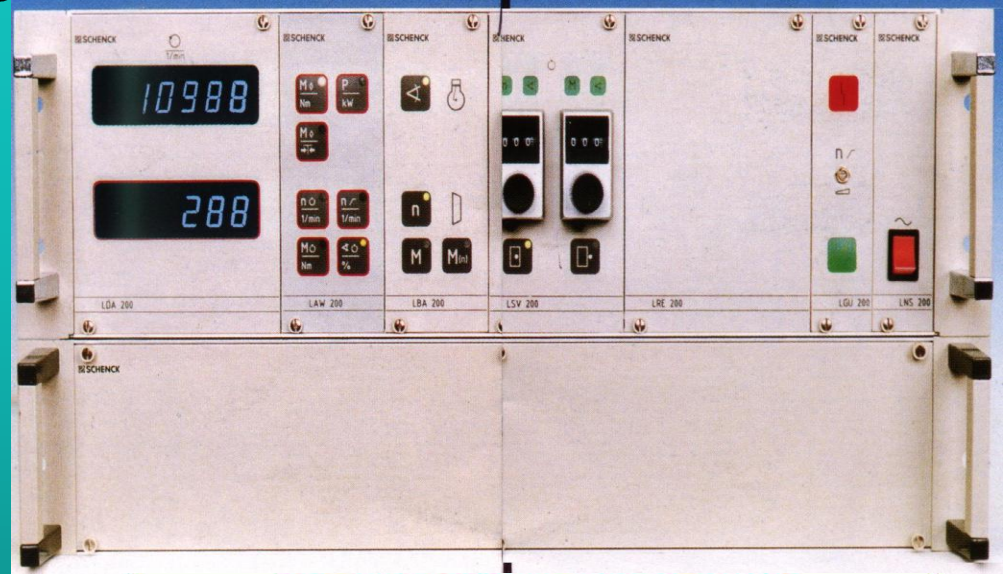
Equipos Visualizadores

La señal que envián los equipos pueden ser desplegadas en pantallas digitales de las cuales la empresa EDELCA dispone de dos modulos programables marca Himmelstein modelo tipo System 6 modelo 6488B; 6-138; 6-562A.

Como otra opción se recomienda el Dysplay de la empresa WIKA “Medidor digital programable modelo 907.50.9x0”.



Unidad de control del Freno Dinamométrico



El freno dinamométrico dispone de una unidad de control, la cual permite operar el equipo, tiene varias funciones como la de:

Operar el freno con revoluciones cttas.

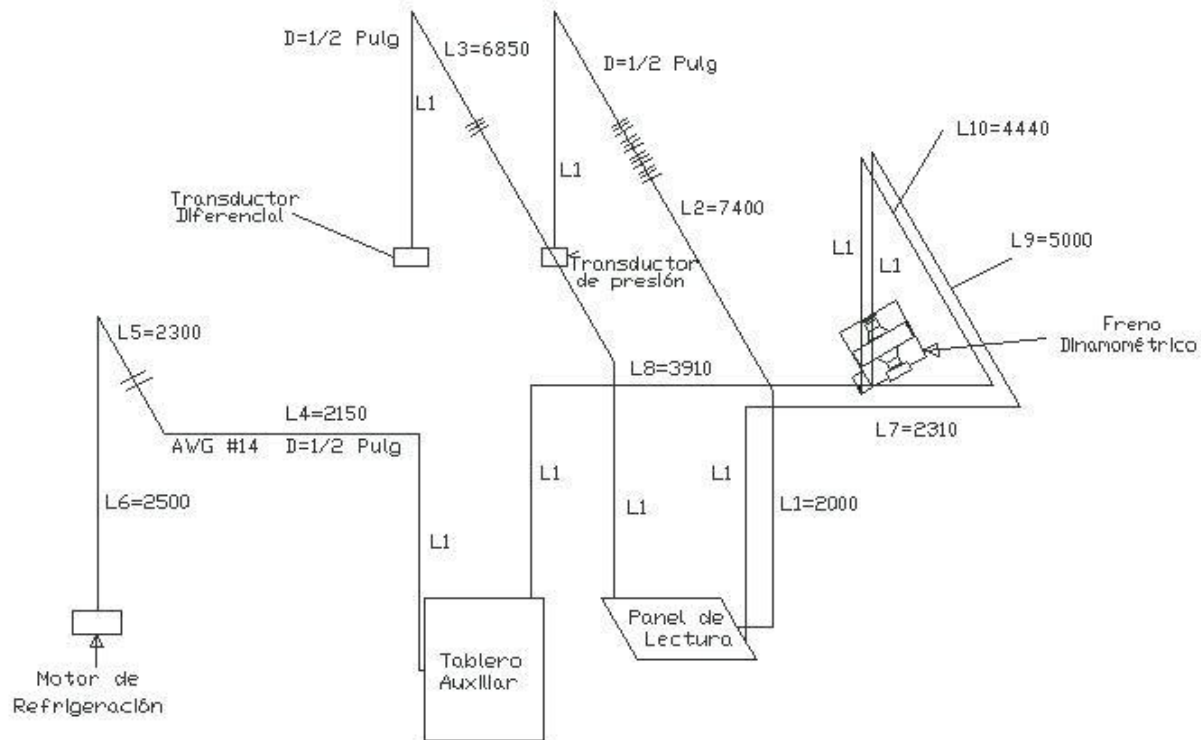
Operar el freno con torque cttc.

Esta unidad digitaliza las variables de Potencia, Torque y RPM que mide el freno.

La conexión de la misma al freno se hace mediante dos Cables de 15mt c/u. Esta longitud es suficiente como para colocar la unidad de control en el cuarto de lectura de variables junto a las demas pantallas digitales.

Especificación técnica Unidad de control	
Voltaje de alimentación	220 V
Frecuencia	50 (60) Hz
Consumo de Corriente	25 AMP
Precisión del indicador de velocidad	1.5 %
Desviación de control de velocidad (con operación a $n = \text{const.}$) modo n.	Tipo ± 10
Desviación de control corriente de excitación (operación modo M)	Tipo ± 1

Esquema del cableado de los equipos de medición



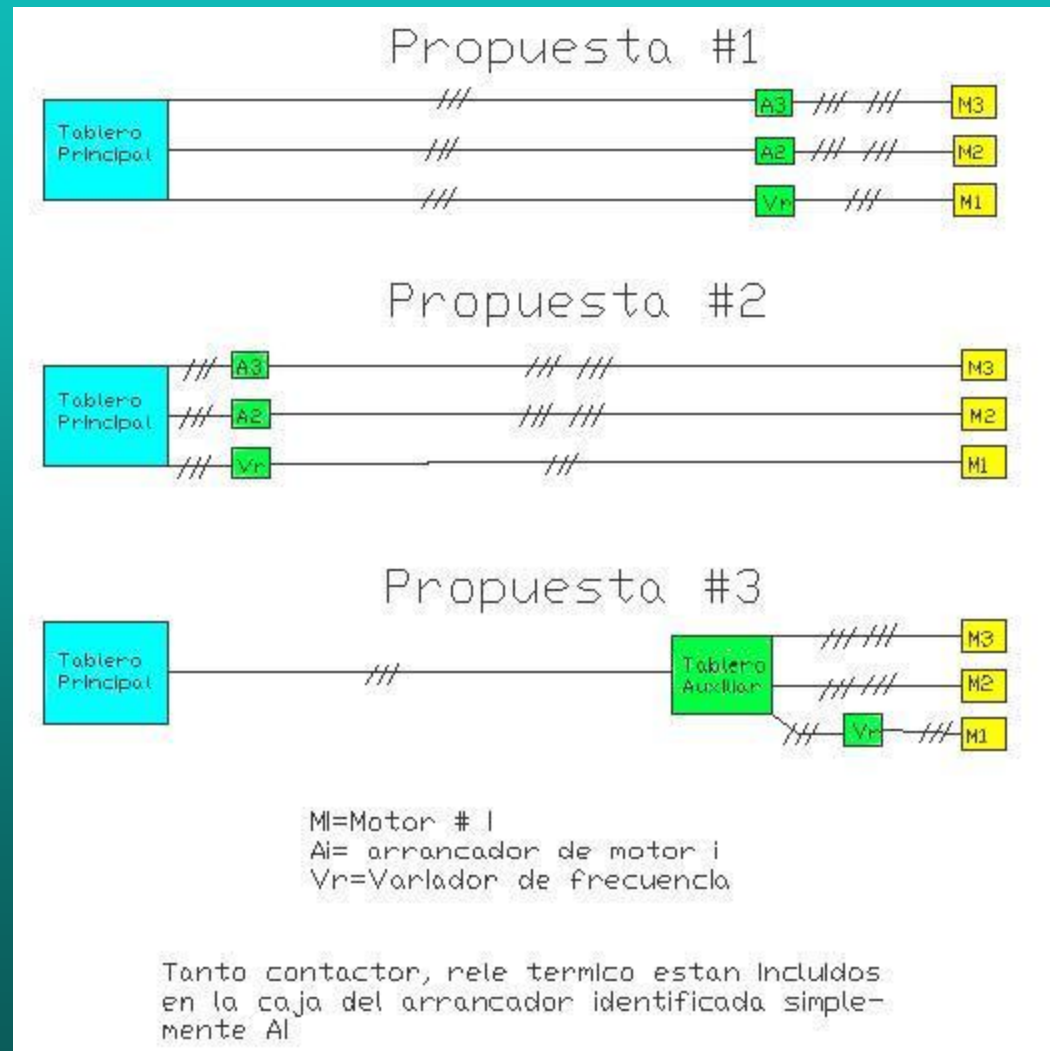
Sistema de Cableado y protección para motores eléctricos

Potencia: 90 HP	Frecuencia: 60 Hz
Tensión: 440/220 V Δ	Factor de potencia: 0,86
Corriente: 111/222 A CA	Iso ¡k! Clase B
Velocidad: 1180 RPM	12 terminales

Para la protección de motores y buena operación de los mismos deben existir los siguientes elementos mencionados en el capítulo anterior:

- ✓ Interruptores principales
- ✓ Contactores
- ✓ Relé térmico
- ✓ Interruptor principal

Sistema de Cableado y protección para motores Eléctricos



Calculo del tamaño de los cables

La intensidad nominal de corriente que circulara por el cable Principal :250 A.
Mediante tabla de CODELECTRA:
MCM 350 D=3 ½ pulg.

Para el cable de los motores dos y tres,
se toma en cuenta su intensidad: 64 A.

AWG#4 D=2 pulg.

Para el cable del motor uno, Intensidad
111 A.

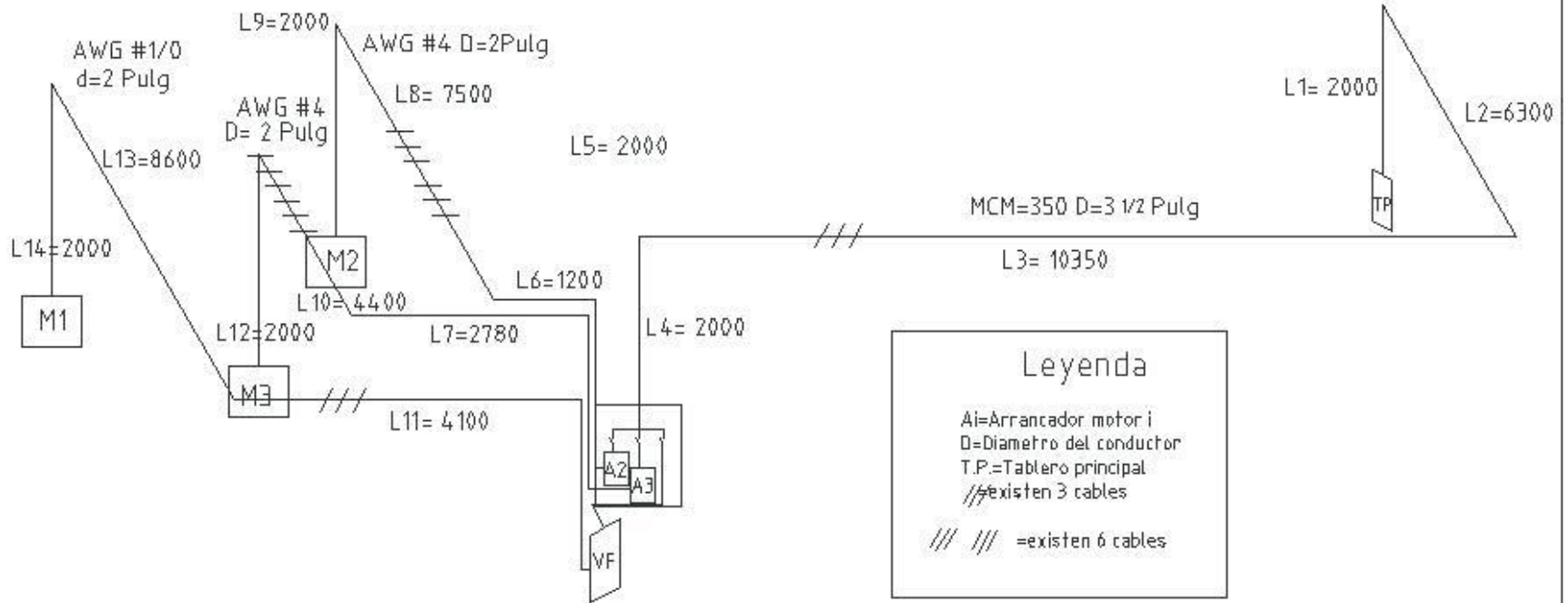
AWG#1/0 D=2 pulg.

Código ARALVEN	Calibre AWG/MCM	Número de Hilos	Espesor del Aislante mm	Espesor de la Cubierta mm	Diámetro Total mm	Radio Mínimo de Curvatura	Tensión de Prueba A.C. Kv	Cobre Peso Total Aprox. Kg/Km	Aluminio Peso Total Aprox. Kg/Km
51-21-092	14	SOLIDO	0,76	0,38	3,90	16	3,5	30	-
51-21-093	12	SOLIDO	0,76	0,38	4,30	17	3,5	42	-
51-21-094	10	SOLIDO	0,76	0,38	4,90	19	3,5	61	-
51-21-095	8	SOLIDO	1,14	0,38	6,30	25	5,5	98	-
51-21-008	14	7	0,76	0,38	4,10	17	3,5	31	-
51-21-010	12	7	0,76	0,38	4,60	18	3,5	44	-
51-21-012	10	7	0,76	0,38	5,20	21	3,5	65	-
51-21-014	8	7	1,14	0,38	6,70	27	5,5	104	-
51-21-016	6	7	1,14	0,76	8,50	34	5,5	168	84
51-21-018	4	7	1,14	0,76	9,70	39	5,5	249	115
51-21-020	2	7	1,14	0,76	11,20	45	5,5	375	163
51-21-023	1	19	1,40	1,14	13,50	54	7,0	491	223
51-21-025	1/0	19	1,40	1,14	14,50	58	7,0	601	264
51-21-028	2/0	19	1,40	1,14	15,70	63	7,0	740	315
51-21-031	3/0	19	1,40	1,14	17,00	68	7,0	914	377
51-21-034	4/0	19	1,40	1,14	18,50	74	7,0	1.131	456
51-21-036	250	37	1,65	1,65	21,20	85	8,0	1.378	578
51-21-038	300	37	1,65	1,65	22,60	90	8,0	1.627	667
51-21-040	350	37	1,65	1,65	23,90	96	8,0	1.875	754
51-21-042	400	37	1,65	1,65	25,10	100	8,0	2.122	841
51-21-044	500	37	1,65	1,65	27,30	137	8,0	2.612	1.012
51-21-046	600	61	2,03	1,65	30,00	150	10,0	3.129	1.207
51-21-048	700	61	2,03	1,65	31,90	159	10,0	3.616	1.374
51-21-049	750	61	2,03	1,65	32,60	163	10,0	3.858	1.460
51-21-051	1.000	61	2,03	1,65	36,70	183	10,0	5.059	1.870

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CABLEADO PARA LOS MOTORES ELÉCTRICOS

TRAMO DEL CABLE	TIPO Y TAMAÑO DE CABLE	LONGITUD APROXIMADA DEL CABLE	NUMERO DE CABLES	DIÁMETRO DE LA TUBERÍA
Cable principal	TTU MCM 350	20650 mm	3	3 ½ pulg.
Cable Motor 1	TTU AWG #1/0	16700 mm	3	2 pulg.
Cable Motor 2	TTU AWG #4	12700 mm	6	2 pulg.
Cable Motor 3	TTU AWG #4	11200 mm	6	2 pulg.

Esquema de Cableado de los motores eléctricos

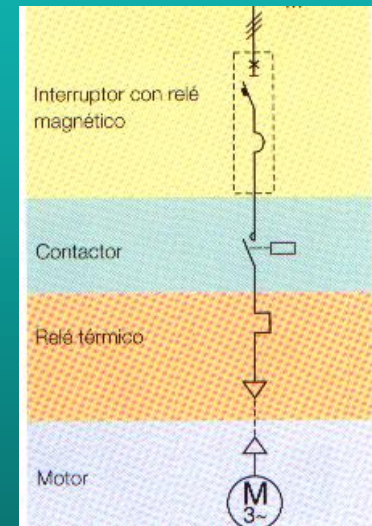


Sistema de Cableado y protección para motores Eléctricos

El tipo de cableado y ubicación del sistema de protección de los motores se diseño de manera tal de minimizar los costos.

Se diseño de manera tal de utilizar tensión en 440V y no 220V con el fin de disminuir el diámetro de los cables y disminuir costos

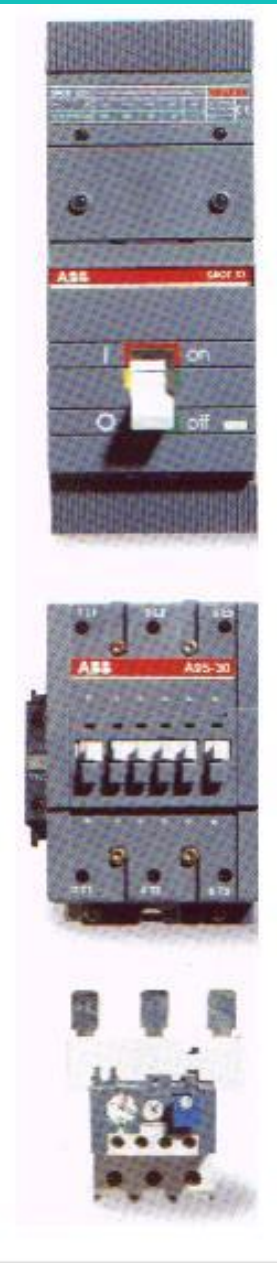
Se proyectaron tres propuestas con el fin de escoger la mas económica.

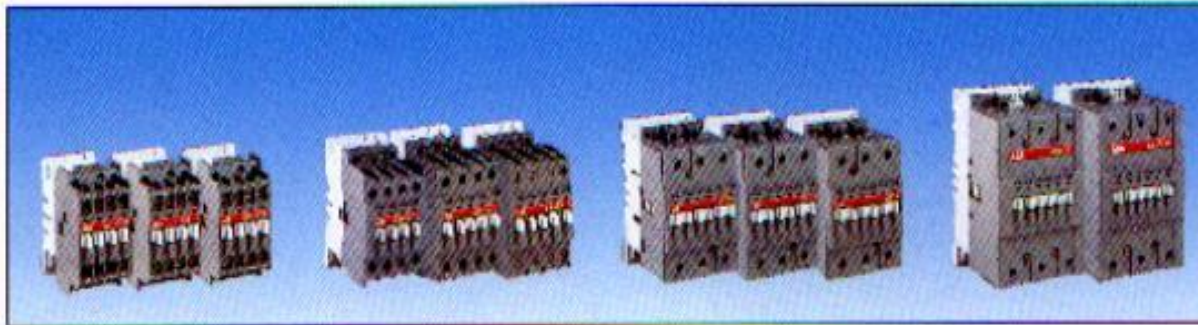


Esquema de protección y arranque de los motores

El interruptor es idóneo para el uso dentro de arrancadores protegidos de tipo tradicional, tiene la protección magnética fija 13 veces superior a la corriente de servicio, es compacto y con excelente prestación en lo que respecta al corte y limitación de la energía pasante.

Interruptor automático para protección de motores ABB SACE S2X 80		
Corriente asignada de servicio [A]		80
Nº polos		3
Tensión asignada de servicio,(c.a) 50-60Hz [V]		690
Poder de corte último en cortocircuito(c.a) 50-60 Hz 440 V [kA]		70
Poder de corte de servicio en cortocircuito [%Icu]		75%
Tiempo de apertura [ms]		3,5
Dimensiones básicas		
A [mm]		80
P [mm]		70
H [mm]		120
Peso [kg]		1,1





A9 A12 A16

A26 A30 A40

A50 A63 A75

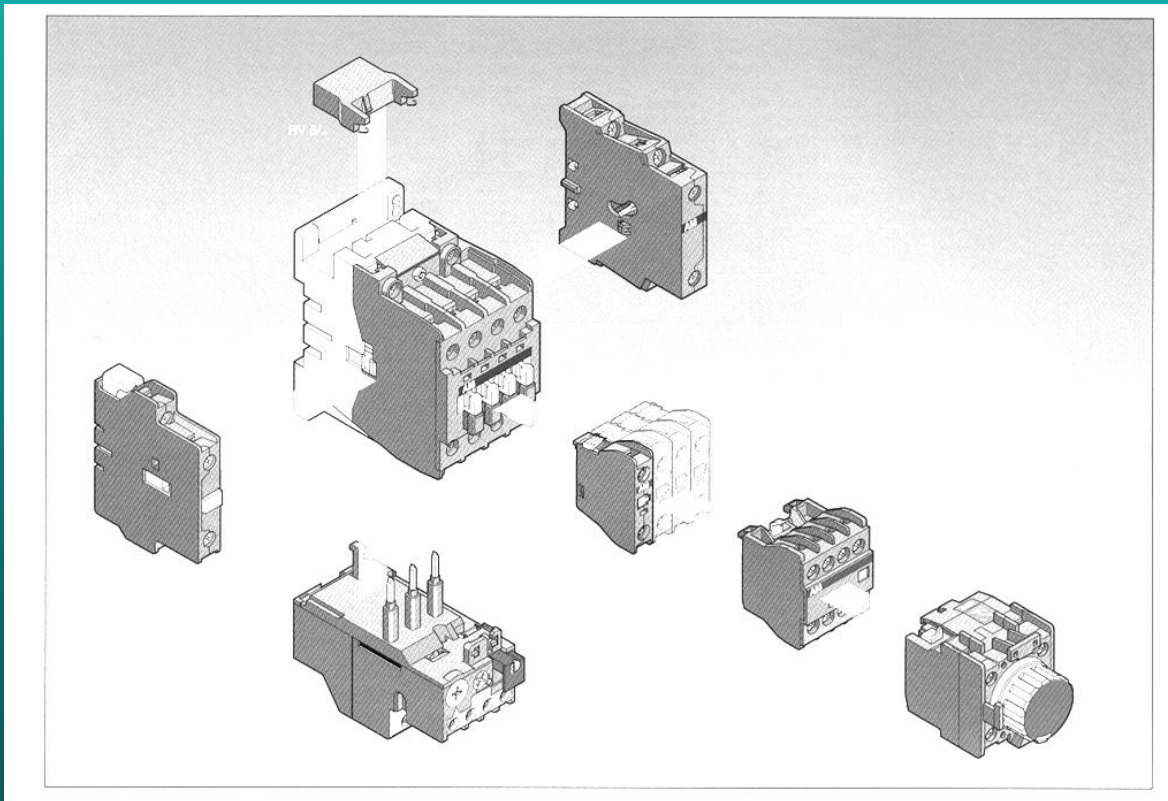
A95 A110

Selección de Contactores

Tipos de Contactores A	A 50	A 95
Potencia AC-3, 400 V	22 Kw.	45 Kw.
Corriente AC-1, 40 °C	100 A	145 A

Accesorios para contactores Tripolares

- ✓ Relé Térmicos
- ✓ Contactos auxiliares
- ✓ Temporizadores
- ✓ Enclavamientos
- ✓ Limitadores de sobretensión



Variador de frecuencia

El sistema de arranque del motor uno, lo proporciona el variador de frecuencia.

El variador que dispone la empresa es el modelo V10547 marca ABB.

Entrada: Voltaje, 380-460 VAC 3 fases%; frecuencia, 50/60 Hz % ; corriente 90 A

Salida: Voltaje, 0-460 VAC 3 fases%; frecuencia, 0-120 Hz %.

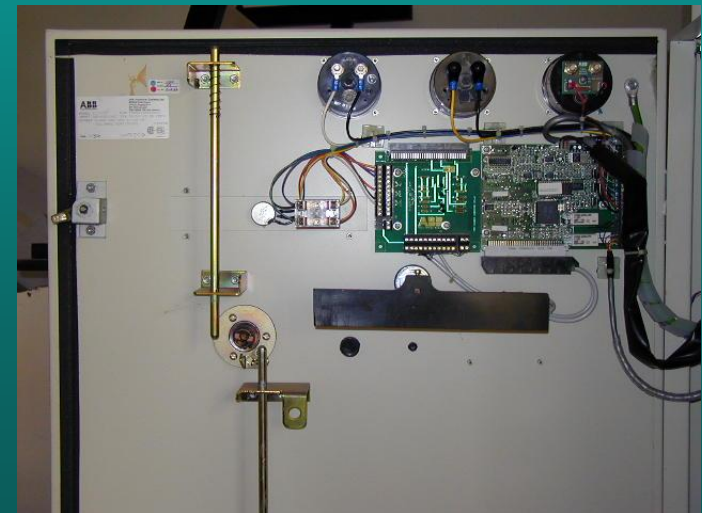
Este equipo dispone de un panel de control digital, con el cual se controla mediante una perilla:

Mínima y máxima frecuencia.

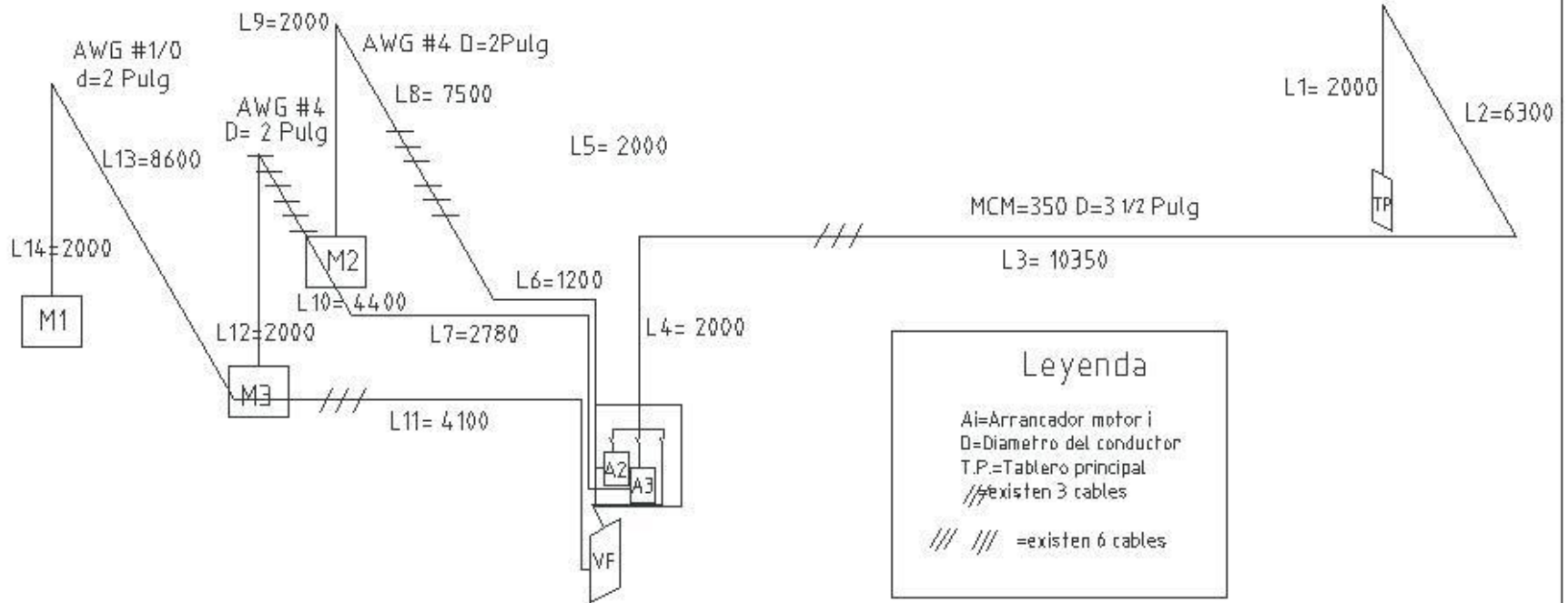
Tiempo de aceleración.

Límite de corriente

Además está equipado con protección comprensiva y funciones de diagnóstico. Que permiten detectar Sobre voltaje, Bajo Voltaje, Sobre corriente, Corto circuito, temperaturas de falla



Esquema de Cableado de los motores eléctricos



Descripción general del procedimiento para calcular los parámetros recomendables

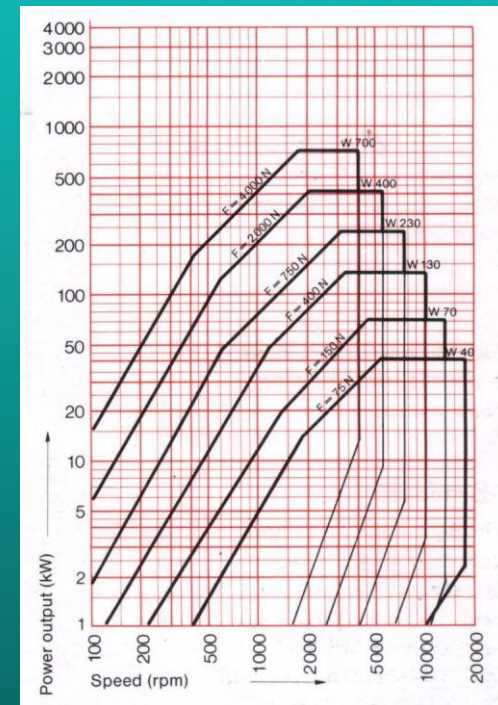
Este procedimiento se proyecta de manera tal de calcular los parámetros principales de un modelo (Q_m, H_m, N_m, D_m) de Turbina Michell-Banki a partir de los parámetros principales de un prototipo (Q_p, H_p, N_p, D_p). El procedimiento se basa en el rango de RPM que permite el freno dinámico en cada punto de operación.

Se describen relaciones de semejanza entre modelo y prototipo con el fin de ajustar los parámetros del modelo a los rangos de medición de los equipos de medición, sobre todo el freno que es el que presenta más problema.

Descripción general del procedimiento para calcular los parámetros recomendables

En el procedimiento siempre se verifica que el freno pueda trabajar en su rango aceptable de velocidad (rpm).

Siempre se recomienda como parámetro principal para el modelo un diámetro $D=300\text{mm}$, con el fin de reducir los problemas de diseño y estructurales en el BPTH, por lo general las rpm del modelo serán muy altas debido a las exigencias del freno sobre todo si el modelo tiene una potencia apreciable 30Kw



Curva de rangos Potencia vs rpm SCHENCK TYPE W .

Recomendación del tipo de operación

De acuerdo a los parámetros principales del modelo, se toma la decisión para el mejor tipo de operación del sistema de simulación.

En este caso se construyó una tabla a partir de las curvas de operación del sistema. La tabla indica el caudal máximo y mínimo así como la altura máxima y mínima para tanto para el sistema de simulación como para la entrada de la turbina.

Tipo de operación	Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Hns min(m)	Hns max(m)
Operación simple	0,05	0,2	Ajustable	27,5
Velocidad Nom.	0,096	0,2	18	29
Operación simple	0,05	0,2	Ajustable	27,5; 19,3 _D
Velocidad Var.	0,081	0,2 ; 0,17 _D	18; 13 _D	29; 20,8 _D
Operación	0,05 _C	0,4	Ajustable	25
Paralelo.	0,192	0,4	18	29
Operación	0,05	0,2	Ajustable	43; 54 _P
Serie.	0,096	0,2	36	48; 58 _P

Rangos de caudal y Altura de carga estimados que puede entregar el BPTH de acuerdo al tipo de operación.

Los valores del sistema de bombeo se indican en la segunda fila de cada fila valga la redundancia, y los que se pueden enviar hacia la turbina están en la primera fila. _C Indica que se logra ese caudal si el sistema de flujo controlado lo permite; _D Indica cuando el sistema trabaja únicamente con velocidad de la bomba 1000 RPM; _P Solo cuando se trabaja con modelos de turbinas hidráulicas Pelton.

Conclusiones

- ✓ Se establecieron los rangos de los parámetros que puede manejar el Banco de pruebas.
- ✓ Se logro la ubicación del freno dinamométrico en la posición tal que permita el montaje de turbinas hidráulicas Michell-Banki, para los modelo mas desfavorable que se puedan probar en este banco de pruebas, logrando así evitar cambios inusuales en los sistema que preceden al rodete.
- ✓ Se realizó una ubicación optimizada y cómoda del resto de los elementos de medición y lectura de las variables del banco de pruebas, para una instalación y desmontaje racional de los equipos e instrumentos.
- ✓ Se realizó un procedimiento que permite calcular las variables principales de un modelo, en función de las variables principales del prototipo para que los equipos de medición funcionen correctamente, principalmente el freno dinamométrico.

Conclusiones

- ✓ Se efectuó la selección de los equipos que integran el banco de pruebas, considerando los parámetros, las especificaciones y los detalles de aplicación para obtener un funcionamiento óptimo.
- ✓ El sistema de instrumentación propuesto tiene las características para cumplir las necesidades específicas y la tecnología adecuada para probar racionalmente los modelos de turbina.

Recomendaciones

- ✓ El freno dinamométrico fue elegido por las razones expuestas en el trabajo, se recomienda hacer una revisión técnica al mismo antes de ponerlo en funcionamiento.
- ✓ No es necesario la elección exacta del modelo de la base propuesta para el freno, ya que algunas medidas fueron arbitrarias, por lo cual se recomienda que se modifiquen tales medidas para la mejor facilidad de construcción que se adapte a los intereses de la empresa.
- ✓ Las tuberías de agua de refrigeración del freno no necesariamente tienen que ser de acero o PVC, si la empresa dispone de suficientes mangueras del diámetro mencionado se recomienda usar las mismas para mejor comodidad de instalación, pero se debe tener en cuenta que las mismas deben ser cambiada cada cierto tiempo.
- ✓ La potencia de la bomba de refrigeración del freno dinamométrico puede ser mayor a los .52 HP expuestos en el trabajo, se recomienda usar bombas sencillas estandarizadas, por ejemplo 1HP, 2/3HP, 1 1/2HP, etc. Claro se debe tener en cuenta que la presión en la entrada del freno dinamométrico no exceda los 4 bar y que cumplan con el caudal, aunque en los casos en que sea muy alta la presión, esto se soluciona estrangulando el fluido con la válvula a la salida de la bomba.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda utilizar otros catálogos de transductores de presión, para buscar otras alternativas de elección de tales equipos.
- ✓ Puesto que el variador de frecuencia es muy antiguo, los repuestos del mismo son escasos en la actualidad, por lo cual se recomienda realizar una inspección técnica en el mismo por gente especializada, a fin de ver si vale la pena ponerlo en funcionamiento por algunos años, de no ser así, será necesario hacer la adquisición de otro si se quiere operar el BPTH de la forma establecida inicialmente.
- ✓ Se recomienda tomar en consideración el procedimiento descrito en el capítulo VIII, para calcular los parámetros principales del modelo de turbina hidráulica, en caso de que se trate de turbina Mitchell-Banki.
- ✓ Es necesario la revisión de las conexiones en las borneras de los motores, para estar seguro de las conexiones expuestas en el trabajo.
- ✓ Se recomienda usar el BPTH para ensayar modelos de turbinas Pelton, ya que su configuración permite que la TH Pelton de eje horizontal se puedan adaptar sin los problemas que se podrían presentar por estar fijo el eje del freno. Además de poder probarse los modelos para grandes alturas, sin existir problemas por el área de salida del distribuidor.

Recomendaciones

- ✓ Se debe tomar en cuenta que se quiere probar TH Pelton, la altura máxima neta a la entrada del rodete puede ser mayor a la propuesta en este trabajo para TH-MB (43m max), en este caso se puede hablar de alturas neta a la entrada del distribuidor de hasta 54m, los instrumentos seleccionados resisten tales condiciones pero se debe hacer un estudio de pérdidas de carga para obtener buenas mediciones.
- ✓ Para el caso que se plantee realizar pruebas a turbinas hidráulicas Francis de eje horizontal e inclusive turbinas Pelton, se debe verificar que las RPM a operar durante las pruebas estén dentro del rango permitido para los valores de potencia al eje del freno dinamométrico.
- ✓ Cuando se trabaje con la modalidad de flujo controlado, se recomienda tener mucho cuidado, ya que el caudal que maneja el sistema de bombeo en esas condiciones no es el mismo que se obtiene en la medición del tubo Venturi, pudiéndose entonces estar operando las bombas en rangos de no estabilidad. Por tal motivo se recomienda buscar una manera para medir la presión en la salida de cada una de las bombas, con el fin de estar seguro de la buena operación del sistema de bombeo.
- ✓ Se recomienda planear una instalación eléctrica con la suficiente capacidad para suplir la energía requerida por el conjunto de equipos del banco de Pruebas para turbinas hidráulicas.

Recomendaciones

- ✓ La energía eléctrica que alimentaría toda la instalación del Banco de Pruebas se puede obtener del conjunto de transformadores de voltaje que se encuentra afuera del Laboratorio de Microcentrales.
- ✓ Para proteger el sistema se debe colocar un tablero de alimentación de voltaje para sacar los puntos de barra para los motores, el freno Dinamométrico y el Variador de Frecuencia.
- ✓ Se deben seguir las normas generales de instalación del freno en la base o fundación de soporte. El fabricante establece que los tornillos sujetadores del freno debe apretarse con procedimiento específico.
- ✓ El conducto de agua a la salida de freno del dinamométrico debe estar colocado con suficiente caída hacia el pozo del laboratorio para evitar el reflujó en el tanque colector.
- ✓ Antes de la conexión del freno, la tubería tiene que estar cuidadosamente acondicionada para remover partículas.

Recomendaciones

- ✓ El servicio de las Partes de la conexión del prototipo o modelo de ensayo, se deben usar los acoplamientos de doble cardan. Debe efectuarse un alineamiento preciso. El desplazamiento axial relativo al eje modelo de ensayo y el eje del freno no debe ser excedido.
- ✓ Todas las partes conectadas a los acoplamientos, discos intermedios, ruedas, disco del freno deben ser balanceadas. La velocidad límite depende de la velocidad de operación.
- ✓ Para una fase posterior del proyecto Banco de Pruebas se recomienda hacer el diseño de los mecanismo de regulación que requeriría el modelo de turbina.

GRACIAS