

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y construcción de una turbina de vapor y su adaptación a un generador eléctrico

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA

Arturo Campos Hernández

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Alejandra Castro González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

1er. SUPLENTE: Dr. Víctor Rodríguez Padilla

2º. SUPLENTE: M.I. Héctor Mora García

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Este tema se desarrolló con la ayuda de la empresa Central de Instrumentación S.A. de C.V., ubicada en Blvd., de las Fuentes 435, Col. Fuentes del Valle, Edo. de Méx. y su sucursal ubicada en Av. Revolución 397, Col. Espinoza, Tecate, Baja California.

Se agradece el apoyo del financiamiento PAPIIT IN 117617 Generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de bolsas de polietileno.

ASESORA DE TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Arturo Campos Hernández

Agradecimientos

A mi madre que con su ejemplo me ha enseñado que tener felicidad es mejor que tener la razón, a defender la familia, la mejor maestra que he tenido, la más constante y la que se ha preocupado por educar mi corazón, que me ha apoyado y demostrado que a veces solo se entiende hablando fuerte y claro con nada mas que sentimientos.

A mi padre que me enseñó que todo se puede lograr si se puede imaginar, que la verdadera ingeniería no está en los libros o en un aula, si no en las servilletas que se dibujan en la hora de la comida sin las cuales este proyecto solo estaría en el cajón de las buenas ideas.

A Fabiola que de ser mi hermana se convirtió en mi hermandad, impulsándome siempre a seguir adelante, siempre confiando en mí, acompañando el camino con sus risas, el escaparate al cual recurrir, la persona que en su visión solo sabe observar soluciones.

A Hugo, el más reservado de todos y el más leal en su comportamiento, el hermano que se nos otorgó para cuidar a la familia, porque la confianza me da, que aun cuando está en desacuerdo en mis proyectos sé que al voltear estará a mi lado.

A Tania, el orgullo de las ovejas negras que me mostro que la contracorriente no solo es necesaria si no es un acto de valor que muchas veces no alcanzo a comprender, me enseñó que el mundo es de quien lo toma haciendo nuestra obligación salir y cambiar lo que nos corresponde.

A la Cha, que solo sabe quererme cuando estoy a su lado, que no sabe entregar una palabra sin regalar su corazón, admirable valentía que jamás podre tener y que me alienta a intentarlo.

A mis amigos, todos aquellos que se convirtieron en mis cómplices, que me hicieron libres estando a su lado, que me escucharon y me entregaron lo que más valoro: su tiempo, que saben estar a mi lado, no para luchar batallas, si no para no tener que pelearlas.

A la Doctora Alejandra, por su increíble paciencia y fe en mí, porque he tenido la suerte de colaborar con ella, quien cuenta con una docencia trascendental y casi extinta en la Facultad de Ingeniería.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	VII
OBJETIVO.....	VIII
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1. FUNCIONAMIENTO DE LAS TURBINAS DE VAPOR	3
1.2. CICLO TERMODINÁMICO DE UNA TURBINA DE VAPOR	4
1.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS DE VAPOR	5
1.4. TURBINAS DE VAPOR PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	7
CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA.....	10
2.1. RECONOCIMIENTO DE LA NECESIDAD	12
2.2. POSIBILIDADES Y LIMITANTES DEL PROYECTO	13
2.3. COMPONENTES BÁSICOS DE LA TURBINA.....	15
2.3.1. ÁLABES.....	16
2.3.2. EJE DE LA TURBINA.....	19
2.4. ACOPLAMIENTOS.....	22
2.5. GENERADOR DE ELECTRICIDAD	26
2.5.1. RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA ELÉCTRICA, MECÁNICA Y VOLTAJE INDUCIDO DEL ALTERNADOR	28
2.5.2. ESQUEMA DE GENERACIÓN DE CD	32
2.5.3. SISTEMA DE CARGA DE LA BATERÍA	33
2.5.4. REGULADOR DE VOLTAJE	34
2.5.5. CONVERSIÓN DE CD EN CA (INVERSOR)	36
2.6. INSTRUMENTACIÓN.....	36
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA TURBINA DE VAPOR	38
3.1. ELEMENTOS MECÁNICOS.....	39
3.1.1. ROTOR	39
3.1.2. ESTATOR.....	42
3.1.3. EJE DE LA TURBINA.....	43
3.1.4. CUERPO DE LA TURBINA	44
3.1.5. ACOPLAMIENTO A ALTERNADOR	46
3.1.6. BASE DE LA TURBINA	47
3.1.7. ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y AUXILIARES	48
3.2. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	49
3.2.1. ALTERNADOR.....	49
3.2.2. BATERÍA E INVERSOR DE VOLTAJE	52
3.2.1. CONVERSIÓN CA A CD	52
3.3. DISEÑO DE ELEMENTOS DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN	52



3.4.	ESQUEMA COMPLETO DE LA TURBINA DE VAPOR	53
CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DE LA TURBINA DE VAPOR		55
4.1.	ENSAMBLADO DE CUERPO DE LA TURBINA CON EJE	55
4.2.	ARMADO DEL ROTOR DE LA TURBINA	58
4.2.1.	ACOPAMIENTO DE ÁLABES	59
4.3.	ACOPAMIENTO DEL ALTERNADOR	62
4.4.	ELEMENTOS DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN	66
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		67
BIBLIOGRAFÍA		69
ANEXO		71



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Ciclo cerrado típico de una turbina de vapor	3
Figura 1.2	Análisis del diagrama de ciclo termodinámico con turbina de vapor	5
Figura 1.3	Diagrama de turbina axial de acción.....	7
Figura 1.4	Grafica de presión y velocidad en una turbina de reacción con escalonamientos	9
Figura 1.5	Esquema de una turbina de reacción	9
Figura 2.1	Diagrama de flujo a seguir del diseño con retornos de retroalimentación.....	11
Figura 2.2	Diagrama de producción de electricidad	12
Figura 2.3	Esquema de una turbina De Laval	15
Figura 2.4	Esquema de álabes de acción	
	16	
Figura 2.5	Construcción de un álabe de acción	17
Figura 2.6	Construcción de álabe de reacción	18
Figura 2.7	Esquema de fuerzas del eje de la turbina.....	20
Figura 2.8	Tipos de desalineación en ejes	23
Figura 2.9	Partes de un cojinete de bolas	26
Figura 2.10	Componentes principales de un alternador	27
Figura 2.11	Circuito equivalente del alternador	31
Figura 2.12	Esquema del alternador con batería y carga	33
Figura 2.13	Esquema de un regulador electrónico conectado a un sistema de carga.....	35
Figura 3.1	Vistas de los álabes del rotor	39
Figura 3.2	Perspectiva del rotor con corona	40
Figura 3.3	Vistas de la masa del rotor	41
Figura 3.4	Vistas del disco de protección	41
Figura 3.5	Vistas del rotor	42
Figura 3.6	Vistas del eje de la turbina	43
Figura 3.7	Vista frontal anterior del cuerpo de la turbina	44
Figura 3.8	Vista lateral y planta del cuerpo de la turbina	45
Figura 3.9	Vista frontal posterior del cuerpo de la turbina.....	45
Figura 3.10	Vista lateral y planta del acoplamiento de quijada	46
Figura 3.11	Accesorios del acoplamiento de quijada	46
Figura 3.11	Vista planta y lateral de la base de la turbina	47
Figura 3.13	Rodamiento de bolas de ranura profunda	48



Figura 3.14	Diagrama y dimensiones del alternador	49
Figura 3.15	Respuesta de alternador RPM vs Volt/Amp.....	50
Figura 3.16	Turbina ensamblada vista lateral.....	53
Figura 3.17	Turbina Ensamblada Vista en planta.....	54
Figura 4.1	Componentes para armado de base y eje de la turbina	56
Figura 4.2	Eje en posición final.....	56
Figura 4.3	Colocación en prensa de balero secundario	57
Figura 4.4	Vista en planta del cuerpo de la turbina armado	57
Figura 4.5	Fijación del cuerpo a la base de la turbina.....	58
Figura 4.6	Instalación de la masa del rotor con giro izquierdo	59
Figura 4.7	Álabes del rotor.....	60
Figura 4.8	Álabes ensamblados a la masa del rotor	61
Figura 4.9	Rotor de la turbina armado con giro izquierdo.....	61
Figura 4.10	Componentes para el sellado del rotor	62
Figura 4.11	Alternador con sujetadores	63
Figura 4.12	Aditamentos para el acoplamiento de quijada modificado.....	63
Figura 4.13	Acoplamiento instalado en eje de alternador.....	64
Figura 4.14	Instalación del acoplamiento en el eje de la turbina.....	64
Figura 4.15	Montaje de acoplamiento de turbina con alternador	65
Figura 4.16	Armado final de la turbina	65
Figura 4.17	Tablero de control e instrumentación de la turbina.....	66
Figura A.1	Plano TVL 01 Cuerpo de la turbina	72
Figura A.2	Plano TVL 02 Cuerpo de la turbina	73
Figura A.3	Plano TVL 03 Cuerpo de la turbina	74
Figura A.4	Plano TVL 04 Cuerpo de la turbina	75
Figura A.5	Plano TVL 05 Eje de Turbina	76
Figura A.6	Plano TVL 06 Álabes de Turbina.....	77
Figura A.7	Plano TVL 07 Disco de protección y sello del rotor.....	78
Figura A.8	Plano TVL 08 Masa de rotor.....	79
Figura A.9	Plano TVL 09 Acoplamiento de quijada y accesorios.....	80
Figura A.10	Plano TVL 10 Estator Posterior	81
Figura A.11	Plano TVL 11 Estator Frontal	82
Figura A.12	Plano TVL 12 Tablero de control.....	83
Figura A.13	Plano TVL 13 Base de turbina	84
Figura A.14	Plano TVL 14 Base de turbina y base de tacómetro.....	85
Figura A.15	Plano TVL 15 Turbina Ensamblada.....	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Factores de choque y fatiga	22
Tabla 2.2	Características de varios tipos de acoplamientos	25
Tabla 2.3	RPM para 50 y 60 Hz según el número de polos	32
Tabla 3.1	Características de alternador a diferentes RPM	51



RESUMEN

El presente estudio proyecta el diseño y la construcción de una turbina de vapor para la docencia e investigación. Es basado principalmente en turbinas de generación industrial debido a la escasa información en potencias menores a 1 kW. Es diseñada para poder ser utilizada, en menor escala, en cualquier aplicación de una maquina térmica rotatoria. La mayoría de las piezas son metálicas, a excepción de algunos empaques y juntas de polímeros especiales para altas temperaturas.

Aunque el vapor para la alimentación de la turbina no es parte de esta tesis se tiene un del supuesto que las características del vapor no excederán los límites de una turbina industrial de baja potencia, esto es con una presión no mayor a 17.6 kg/cm^2 y una temperatura que no exceda los $260 \text{ }^\circ\text{C}$. La cantidad de vapor se asume como vasta para todos los procesos y es necesaria una presión mínima de 12 kg/cm^2 .

Existen tres grandes etapas en las que se puede dividir este proyecto: diseño abstracto, proyección y construcción, la primer etapa está basada en conocimientos previos, una ingeniería teórica mezclada con creatividad e imaginación que difícilmente pueden ser plasmados en esta tesis, la segunda implica una ingeniería aplicada, recopilación de información, estudios de posibilidades y proyecciones reales de la primera etapa, la construcción es una ingeniería de campo usando desde los oficios más simples hasta habilidades desarrolladas con los años, todos los procesos son de igual utilidad y jerarquía.

El resultado es una turbina de acción con una gran flexibilidad, otorgando la oportunidad de verificar el cambio de los parámetros eléctricos en función de los mecánicos. Es diseñado con una medición paso a paso de cualquier etapa de generación y una sencilla modificación de parámetros. Es posible escalonar las características de la turbina con innovaciones acorde a las necesidades del usuario sin que conlleve una transformación profunda o costosa en las otras áreas de la turbina.



INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tecnologías para la producción de electricidad como plantas termoeléctricas, geotérmicas, nucleotérmicas, ciclo combinado, entre otras, la producción de calor en cada una de estas tecnologías es dirigida directa o indirectamente a turbinas de vapor, dando como resultado que más del 75% de la generación de electricidad a nivel mundial esté relacionado con algún tipo de turbina de vapor.

El amplio uso de turbinas de vapor se debe principalmente a la flexibilidad en el diseño de las turbinas, ya que pueden ser construidas con base a las necesidades de los usuarios. El conocimiento correcto para el uso y producción de turbinas de vapor es de vital importancia para la industria mexicana.

El uso de prototipos para experimentación y aprendizaje es cada vez más necesario para un adiestramiento real y útil en el campo laboral. El presente prototipo tiene como fundamento participar en el ámbito pedagógico ya que sirve como base experimental de innumerables objetivos, como la aplicación y uso de energía obtenida en proyectos de biocombustibles y energías renovables.

El impacto al medio ambiente deriva principalmente de la tecnología con la que se obtenga la energía del vapor, la turbina en funcionamiento independiente es plenamente amigable con el medio ambiente, su mantenimiento es sencillo y económico, por lo que si en algún futuro una nueva tecnología limpia es normalizada la adaptación a las turbinas de vapor sería un paso sencillo y necesario. La turbina de vapor sin duda es una máquina que por sus características tendrá un papel representativo en la era posterior a la de los combustibles fósiles.

Proyectos realizados desde diseño hasta construcción no es un concepto habitual en la UNAM, la presente tesis refuerza en sus apartados el cambio de esta concepción y espera incentivar a futuras generaciones en la búsqueda de creación y diseño, pilar magno de la ingeniería.



OBJETIVO

Diseñar y construir una turbina de vapor a nivel laboratorio adaptándola a un generador eléctrico para la Facultad de Ingeniería.

Objetivos específicos

- Construir una turbina sin materiales o equipos especializados alcanzando el menor costo posible.
- Desarrollar la turbina con capacidad y flexibilidad usándose tanto en el área de experimentación e investigación de la ingeniería como en su área docente.
- Perfilar una turbina escalable para que el trabajo presentado sea base de un diseño de turbina de laboratorio de mayor grado.
- Acoplar un sistema de medición con datos cuantificables acerca del comportamiento de la turbina en tiempo real.
- Implementar un sistema de generación eléctrica acorde a la capacidad de la turbina.
- Promover el conocimiento en México con prototipos diversos que por su sencillez sean más productivos y mejor aprovechados (ejem.: gasificación, generación, incineración, etc.)



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

La demanda de energía en el mundo pre-industrial es satisfecha principalmente por la fuerza del hombre, de los animales y al uso limitado de la madera para la calefacción, cocina y fundición de metales. La inducción electromagnética descubierta por Michael Faraday en 1830 desata una nueva serie de eventos el cual lleva a la humanidad al descubrimiento de la electricidad y su necesidad de generarla (Álvarez, 2005).

De esta necesidad nacen diferentes tipos de máquinas con la única finalidad de obtener energía eléctrica por cualquier medio disponible. El descubrimiento de carbón abundante, su amplio uso para obtención de energía calorífica, el alto poder energético de vapor, los altos impactos en la economía por las máquinas y las nuevas aplicaciones encontradas a la electricidad desatan una insaciable búsqueda que se ve consumada en las turbomáquinas para generación eléctrica. Aunque en un principio las máquinas de vapor son usadas para generar cualquier tipo de movimiento, rápidamente se hacen notar las grandes ventajas de usar ese movimiento en un generador, forjando características específicas en las máquinas de vapor para dar paso a lo que hoy conocemos como una turbina de vapor.

La historia de la turbina se remonta a finales del siglo XIX (1884), cuando apareció el primer prototipo de turbina conocido en la actualidad. Fueron De Laval inventor sueco (1845-1913) y De Parsons (1854-1931) quienes crearon las primeras turbinas de vapor. La primera turbina de vapor de acción y de un solo escalonamiento fue la De Laval. Presentaba una o varias toberas donde se conseguía la energía cinética justo antes de entrar a las paletas (álabes) (Álvarez, 2005).

Parsons usó desde los inicios los escalonamientos consecutivos en sus turbinas de reacción formados por álabes fijos y coronas de álabes rotativos. En cada escalonamiento se convertía en energía cinética un pequeño diferencial de presión hasta llegar a la presión de escape. Antes de la primera guerra mundial no se conocían los comportamientos de los metales a altas temperaturas y se trabaja con presiones moderadas (1.2 - 1.6 MPa) y temperaturas inferiores a 350 C.

Los años entre la Primera y Segunda Guerra Mundial fueron el período del primer gran crecimiento de la explotación del petróleo, más recientemente una nueva fase comenzó a finales del siglo XX con el uso de gas natural (Enriquez, 2009), a la par de este crecimiento industrial nuevas tecnologías son desarrolladas gracias a diferentes descubrimientos en la transformación de la energía.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Entre 1915 y 1920 se consiguieron potencias de 20 MW y de 1920 a 1940 aumentaron las presiones hasta un rango de 12 a 17 MPa. Aparecieron las turbinas de condensación y de contrapresión (se descarga el vapor húmedo de la turbina a un condensador a una presión inferior o superior a la atmosférica respectivamente). Se generalizó el uso de aceros aleados y aumentó notablemente el rendimiento económico al aumentar la temperatura de trabajo (Polo, 1984).

Con la aparición de los aceros austeníticos se mejoraron las prestaciones llegando a trabajar hasta unos 35 MPa y temperaturas iniciales de entre 500 y 580°C. La revolución en el sector energético aportada por la energía nuclear causó la aparición de turbinas adaptadas a estas instalaciones debido al diferente estado inicial del vapor respecto a las centrales de aportación de energía de origen fósil.

En la actualidad se construyen calderas que trabajan en condiciones supercríticas por encima de 600°C. La turbina de vapor es en la actualidad uno de los motores más versátiles en cuanto a sus aplicaciones. La máquina acoplada a una turbina de vapor puede ser accionada directa o indirectamente por la turbina a través de un reductor de velocidad (con mucha frecuencia transmisión mecánica por engranajes). Existen básicamente dos tipos de aplicación para la turbina de vapor, las aplicaciones industriales y la generación de energía eléctrica:

a) Turbinas industriales

En su mayoría formadas por un solo cuerpo, y de ellas se obtienen potencias superiores a los 0.1 MW e inferiores a los 150MW, las velocidades de giro se encuentran entre las 3000 y 16000 revoluciones por minuto (RPM), su movimiento mecánico puede ser adaptado para uso final.

b) Turbinas para generación de energía eléctrica

La turbina de vapor es el motor número uno en importancia para la generación de energía eléctrica, tanto en centrales de combustible fósil como en las de combustible nuclear. El 75% de la energía eléctrica proviene de centrales térmicas que ocupan turbina de vapor (Álvarez, 2005), ocupando un papel preponderante a nivel mundial.

1.1. Funcionamiento de las turbinas de vapor

La turbina de vapor es el motor térmico más grande que se fabrica. Es un motor de combustión externa, y por tanto, los gases de combustión no se mezclan con el fluido de trabajo (vapor de agua). El intercambio de energía se suele hacer en una caldera o en otros dispositivos. El propósito de una turbina es convertir la energía térmica del fluido en energía mecánica en el eje de la máquina. El empleo de vapor como fluido de trabajo se debe a su alta capacidad de recibir y ceder energía, pero fundamentalmente porque es abundante y fácil de manejar (con un ciclo de líquido-vapor-líquido dentro de rangos de temperatura aceptables).

El vapor es generado en una caldera mediante agua líquida y calor, este generador de vapor es solo parte de un conjunto de instalación motriz y es donde procede la combustión de algunos de los elementos combustibles (carbón, gas natural, diesel, etc.), al generarse el vapor es encausado a la turbina, la segunda parte del proceso, donde tiene lugar la expansión de los gases, y por tanto donde se obtiene la potencia útil, al salir de la turbina se halla un condensador y una bomba por la que el fluido (en este punto condensado) adquirirá la presión de la caldera y será reinsertado convirtiéndolo en un ciclo termodinámico.

En el sector industrial existen diferentes ciclos termodinámicos para la obtención de energía, en todos los casos en los que es usado el vapor como fluido, la turbina es el segmento principal del ciclo. La Figura 1.1 muestra el principio de operación de una planta termoeléctrica con turbina de vapor, en su eje continua hasta el generador eléctrico. Sigue a la turbina el condensador, donde el vapor vuelve a su estado líquido, por último la bomba reintegra a la caldera el agua líquida que sale del condensador, cerrando el ciclo.

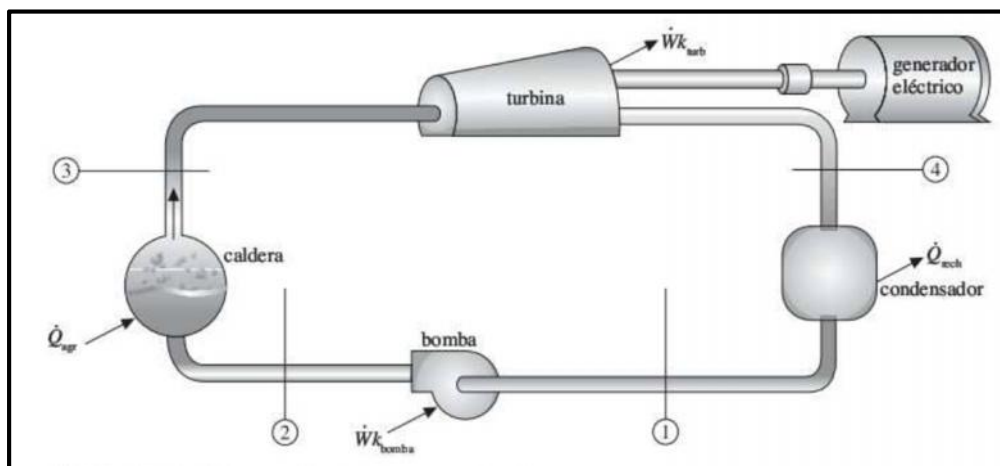


Figura 1.1 Ciclo cerrado típico de una turbina de vapor (Rolle, 2006)



1.2. Ciclo termodinámico de una turbina de vapor

El diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal está formado por cuatro procesos: dos isotrópicos y dos isobáricos. La bomba y la turbina son los equipos que operan según procesos isotrópicos (adiabáticos e internamente reversibles). La caldera y el condensador operan sin pérdidas de carga y por tanto sin caídas de presión. Los estados principales del ciclo quedan definidos por los números del 1 al 4 en el diagrama T-s (1: vapor sobrecalentado; 2: mezcla bifásica de título elevado o vapor húmedo; 3: líquido saturado; 4: líquido subenfriado) (Moran, 2005).

Los procesos de la Figura 1.2 son los siguientes para el ciclo ideal (procesos internamente reversibles):

- a) Proceso 1-2: Compresión isotrópica en una bomba el fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.
- b) Proceso 2-3: Adición de calor a presión constante en una caldera. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado de alta presión es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo (la potencia neta del ciclo se obtiene realmente descontando la consumida por la bomba, pero ésta suele ser muy pequeña en comparación y suele despreciarse).
- c) Proceso 3-4: Expansión isotrópica en una turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma.
- d) Proceso 4-1: Rechazo de calor a presión constante en un condensador, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga (Rolle, 2006).

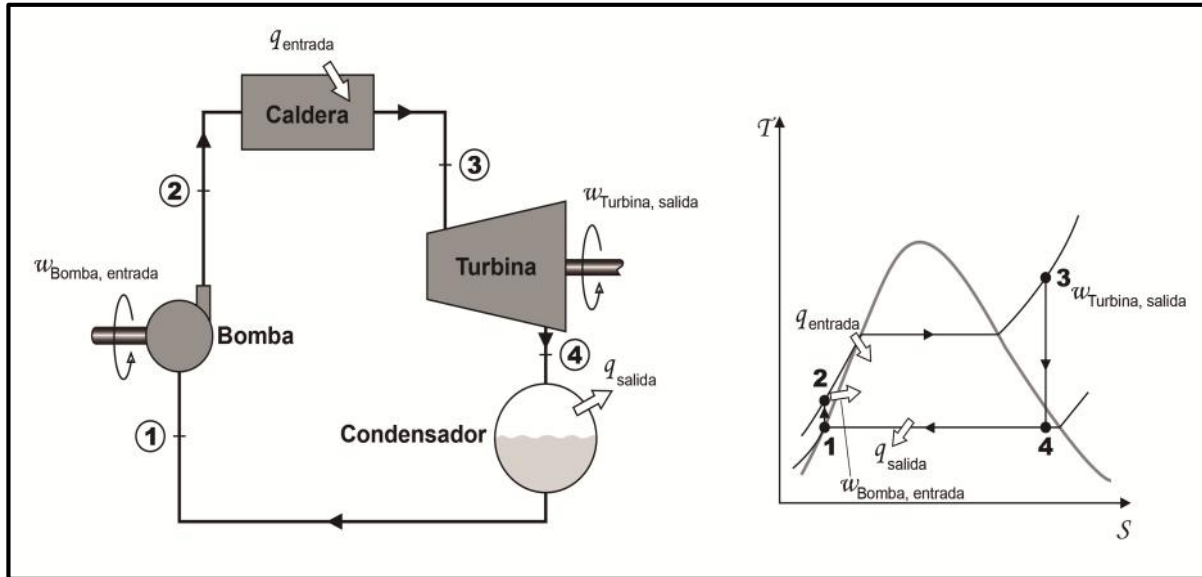


Figura 1.2 Análisis del diagrama de ciclo termodinámico con turbina de vapor
(Elaboración a partir de Rolle, 2006)

1.3. Clasificación de las turbinas de vapor

Existen muchos criterios para la clasificación de las turbinas de vapor, los principales son:

a) Según las aplicaciones del vapor de salida:

De condensación: en donde la presión de salida es inferior a la presión atmosférica (del orden de 30 a 60 mbar), y este se descarga a un condensador, es la turbina más habitual en las centrales termoeléctricas convencionales.

De escape libre: En la que la presión de salida del vapor es la atmosférica.

De Contrapresión: Con presiones de descarga de algunos bar por encima de la presión atmosférica para aprovecharla en otros usos. Muy usadas en cogeneración (Álvarez, 2005).

b) Según la velocidad de giro:

Alta velocidad: Utilizadas normalmente para la impulsión de sistemas mecánicos como son compresores y bombas. Suelen tener sistemas a la salida para modificar la relación velocidad / fuerza.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Baja Velocidad: Generalmente destinadas para mover alternadores para la generación de energía eléctrica, con velocidades de 1800 a 3000 RPM, la velocidad de giro mantiene una relación con la frecuencia de generación.

c) Según la dirección del flujo de vapor

Axiales: El flujo del vapor sigue la misma dirección que el eje de la turbina, son las más utilizadas para la generación de electricidad ya que con esta dirección de entrada, una vez aprovechada la energía del vapor, tiende a salir de forma natural por la parte posterior del rotor facilitando un segundo aprovechamiento con otro rotor montado en el eje (escalonamiento).

Radiales: El paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina, es decir su flujo tiene la dirección del radio de la turbina, pudiendo ser centrípeto o centrifugo. La ventaja de este tipo de turbinas es que su carcasa no es sometida a grandes presiones con lo que su costo de construcción es menor.

La principal desventaja de las turbinas radiales es que no existe manera de instalar escalonamientos internos, por lo que es necesaria la colocación de dos turbinas en serie para aprovechar el fluido.

d) Según el lugar de expansión del flujo

Acción: El vapor entra por toberas de admisión en las cuales se expande. Su expansión significa una caída de presión gradual en la tobera acompañada de un considerable aumento de volumen y de velocidad que es aprovechado para hacer girar el eje. Una turbina de acción se caracteriza porque la expansión, únicamente, tiene lugar en el estator o parte fija de la turbina.

Reacción: Las turbinas de reacción se caracterizan porque la expansión del vapor se produce idealmente en sus partes móviles.

Los álabes se ven impulsados, no por la energía cinética del vapor como en las turbinas de acción, sino por el efecto de reacción, al tener lugar en ellas un incremento de la velocidad relativa del vapor respecto a los mismos debido a la expansión.

En la práctica no se construyen turbinas de reacción pura, trabajan por una combinación de los dos efectos acción y reacción. Se denomina grado de reacción a la fracción de la expansión producida en la corona móvil respecto a la total, un grado de reacción 1 indica que la turbina es de reacción pura, mientras que para el valor cero será una turbina de vapor de acción (RENOVETEC, 2013).

1.4. Turbinas de vapor para generación de electricidad

Existen muchos otros tipos de clasificaciones de turbinas y dentro de ellos pueden surgir diferentes composiciones. Dentro de estos tipos dos específicas tipologías de turbinas son de primer uso para la comprensión de generación (Álvarez, 2005):

a) Turbina de Laval

La turbina de axial de acción fue la primera y más representativa de las turbinas, es la más apta para comenzar el buen entendimiento de todos los tipos de turbinas. La Figura 1.3 muestra una turbina axial de acción (De Laval), el rotor de la turbina está provisto de álabes, a los que precede una serie de toberas de admisión de vapor tipo convergente-divergente, que convierten energía de presión en energía de velocidad, para así poder tener chorros de vapor de alto poder dinámico que atacan directamente los álabes del rotor y los hacen girar. En el rotor la presión se mantiene constante y disminuye la velocidad del vapor.

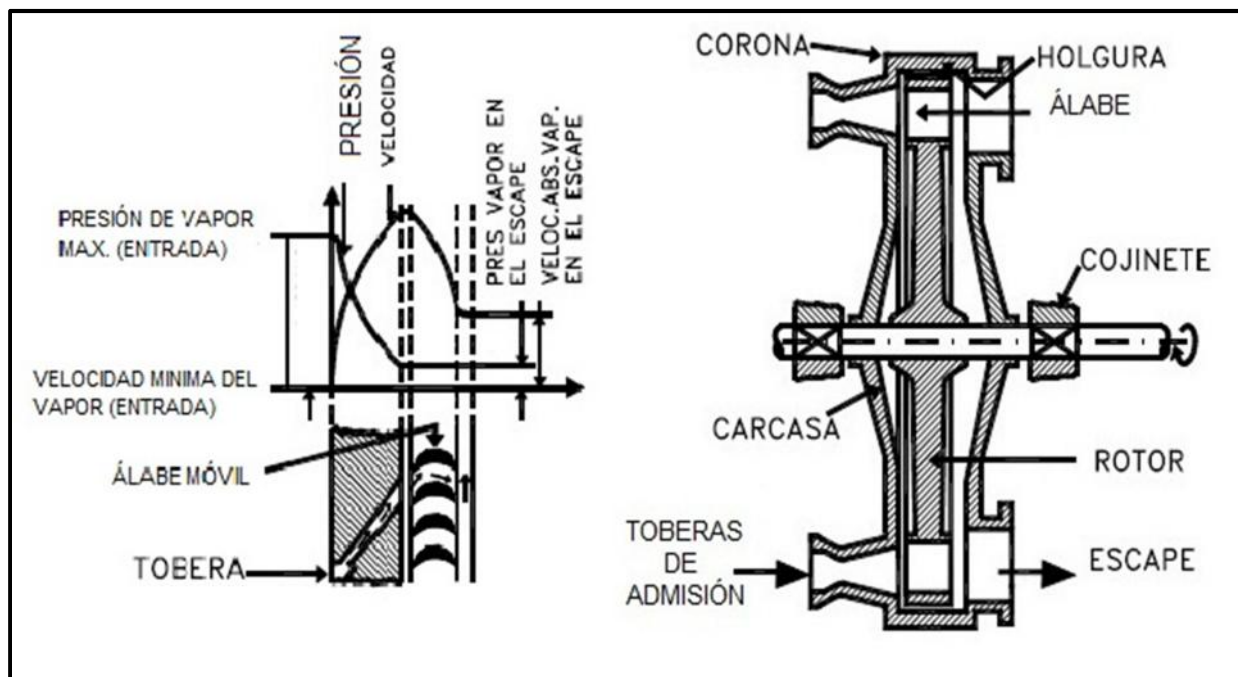


Figura 1.3 Diagrama de turbina axial de acción (Fernández, 2011)

La presión al entrar en la tobera, disminuye en ésta por la expansión, hasta el valor final del escape, y no varía en los álabes móviles. Los extremos superiores de los álabes van recogidos en una corona que deja una cierta holgura entre ella y la carcasa.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Una parte del caudal de vapor podría pasar por dicha holgura sin actuar en los álabes, para impedir que dicho flujo no actúe sobre los álabes se colocan los denominados cierres (normalmente laberínticos), cuya función se basa en impedir que el flujo se escape. Por tanto, en las turbinas de acción toda la expansión del vapor se realiza en órganos fijos o toberas, aprovechándose la energía cinética del vapor obtenida, en las siguientes ruedas de álabes móviles.

No se puede lograr toda la expansión en una sola etapa de toberas ni recoger toda la energía cinética en una sola rueda de álabes, por lo que se realizan modificaciones en escalonamientos de presión (Rateau) y escalonamientos de velocidad (Curtis), para su mejora.

b) Turbina de reacción

Las más utilizadas para el sector energético en la actualidad son las turbinas de baja velocidad, axiales, de reacción con diferentes variantes en la aplicación del vapor de salida. En la actualidad puede decirse que solo se construyen nuevas plantas de cogeneración (de contrapresión). Sin embargo, las plantas convencionales (de condensación) siguen teniendo un papel preponderante en la generación.

La Figura 1.4 muestra una turbina de reacción de tres escalonamientos. Tiene tres ruedas de álabes móviles sobre el eje, y tres diafragmas de álabes fijos unidos a la carcasa. La caída de presión o expansión, tiene lugar tanto en los álabes fijos, como en los móviles, de una forma gradual desde la presión de admisión hasta la de escape, es decir, seis escalones de presión por tres escalonamientos, la gráfica de presión y temperatura se muestra en la parte superior de los álabes.

El primer diafragma de álabes produce una primera expansión del vapor gracias a bajar un escalón de presión. De aquí el vapor, a gran velocidad, incide sobre la primera rueda móvil. En ésta los álabes reciben su impacto por energía cinética y son impulsados por el efecto de “acción”, pero además, el vapor continúa expansionándose en los álabes móviles, impulsándolos al abandonarlos por el efecto de “reacción”.

Las ruedas y los diafragmas tienen sus álabes dispuestos en forma divergente, de manera que los espacios entre ellos permiten la expansión del vapor. En la Figura 1.5 se observa como el perfil de los álabes de reacción es distinto del de los de acción, su principal diferencia es que no son simétricos.

El borde de ataque que encuentra el vapor es mucho más grueso que el filo trasero. De esta manera, resulta que el espacio entre dos álabes consecutivos es mayor a la salida que a la entrada, por lo cual la expansión del vapor sigue produciéndose a través de los álabes, esto se verá más a detalle en la sección de álabes de la planeación.

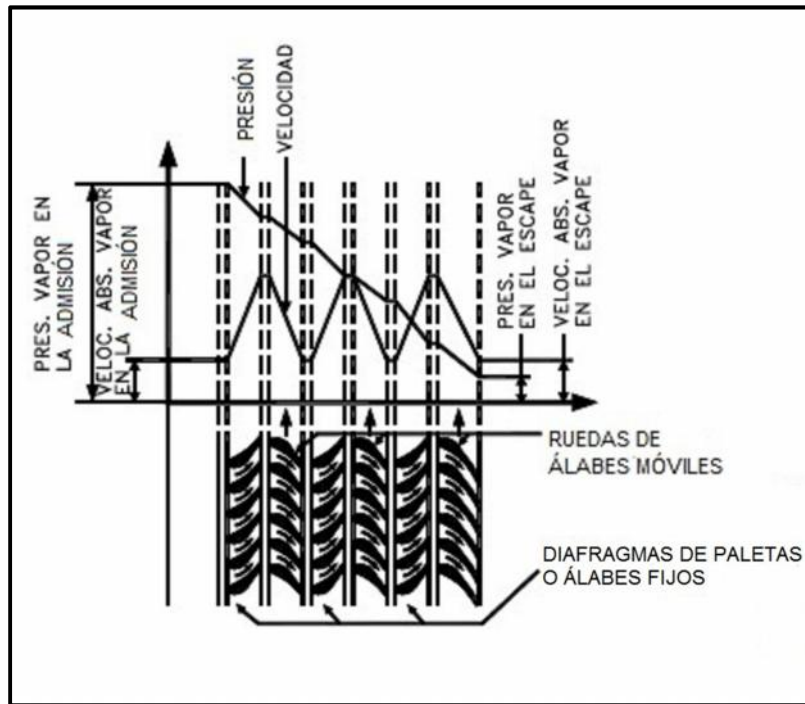


Figura 1.4 Grafica de presión y velocidad en una turbina de reacción con escalonamientos (Mateos, 2011)

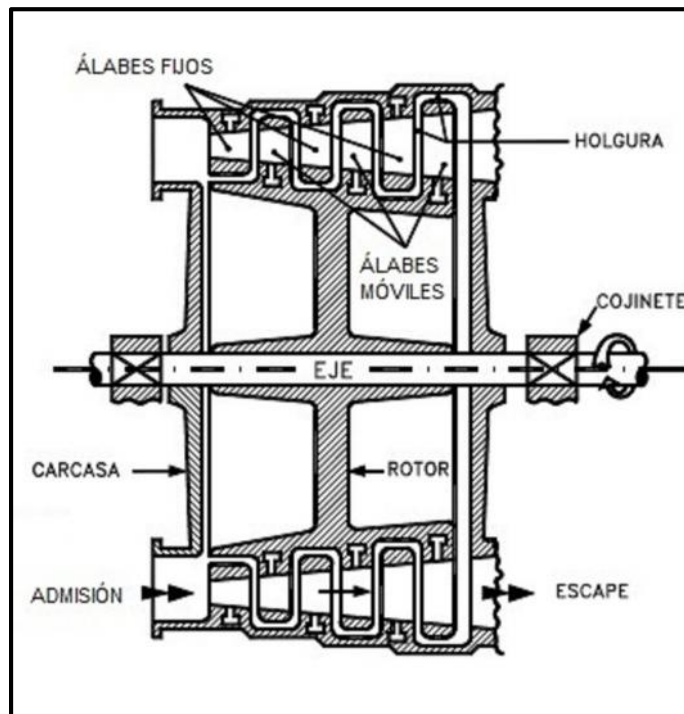


Figura 1.5 Esquema de una turbina de reacción (Mateos, 2011)



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

El elemento vital en este proyecto es el diseño de la turbina de vapor, y de él partirá su acoplamiento para la generación de electricidad y su aplicación al uso común. Un diseño es el mecanismo mediante el cual una necesidad es convertida en un plan funcional y significativo (Deeutschman y col., 1996). La Figura 2.1 muestra la metodología a seguir en todo el proyecto. Es importante destacar que la tendencia en el diseño es a usar componentes de uso común y fácil acceso, disminuyendo costos y promoviendo la creatividad.

Existe mucha teoría y variables asociadas a una turbina de vapor y a su uso en el sector eléctrico, por razones prácticas esta tesis se limitara a perfilar en el diseño las involucradas con funcionalidad y seguridad, pero muchas otras son tomadas en cuenta en el proyecto (Deeutschman y col., 1996):

- a) *Diferencia entre teoría y práctica.* La teoría de cualquier sistema muchas veces es considerablemente diferente a la experiencia resultante.
- b) *Variaciones en el maquinado de los componentes.* Siempre existe una diferencia entre un componente y otro, aún si son del mismo fabricante.
- c) *Efecto térmico en la variación de características de los materiales.* La temperatura asociada al fluido que se use para hacer girar la turbina tendrá un valor bastante representativo en el desempeño de la turbina.
- d) *Variaciones en las propiedades predeterminadas de los materiales.* Usualmente los valores proporcionados por el fabricante son los mínimos, pero pueden existir variaciones.
- e) *Efecto del tamaño con respecto a las propiedades de resistencia del material.* Por lo general, componentes mayores fallan a un esfuerzo menor que componentes menores hechos del mismo material.
- f) *Fatiga de materiales.* Es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas (Callister, 2000) en este caso cíclicas.
- g) *Fricción.* Es el Rozamiento entre dos cuerpos en contacto, variara directamente con la potencia de la carga e inversamente con el radio de curvatura de los elementos que ruedan (Norton, 2011).
- h) *Lubricación.* Implica el empleo de un lubricante entre las superficies de roce con el fin de eliminar o reducir la superficie real de contacto (Hall y col., 1990).

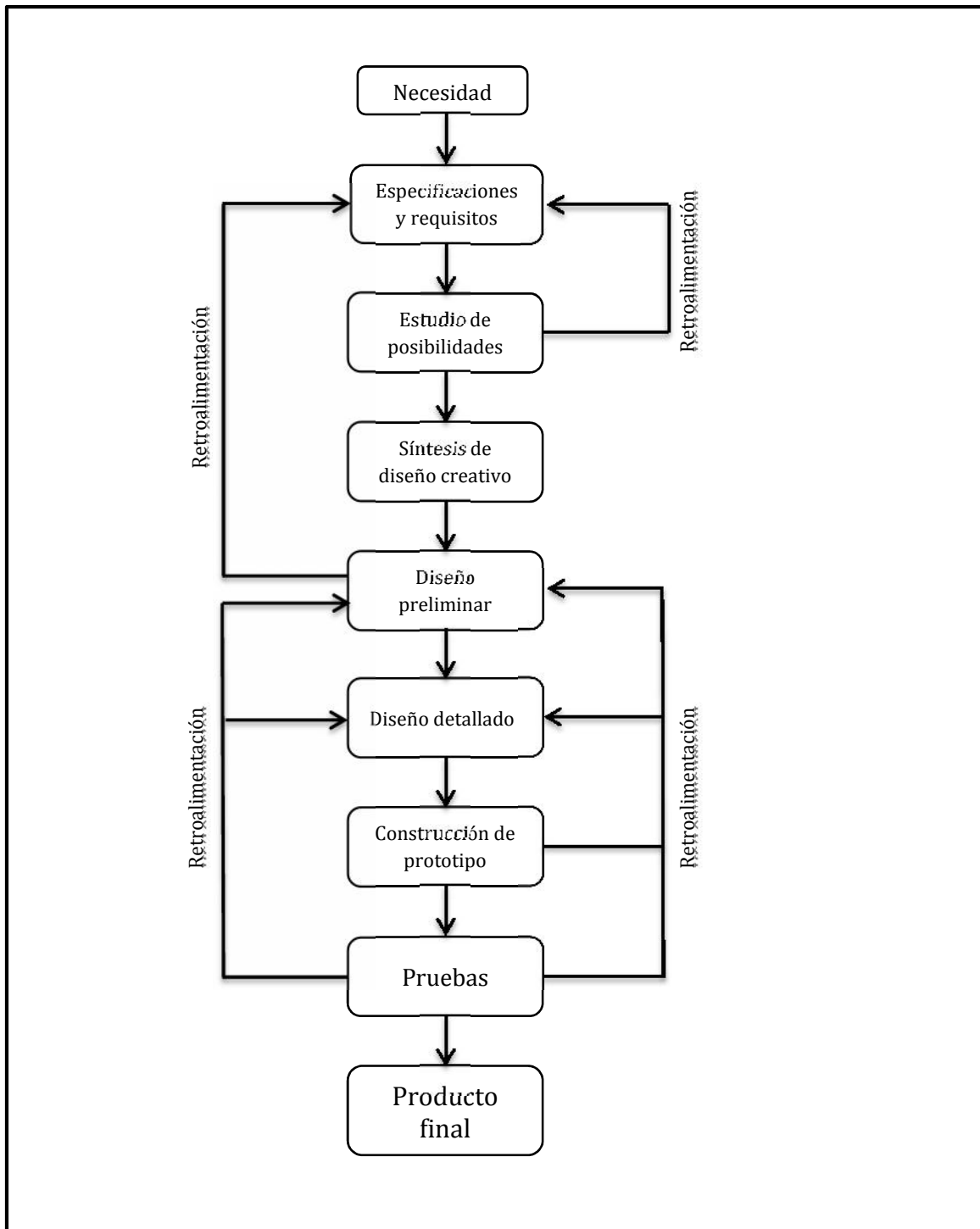


Figura 2.1 Diagrama de flujo a seguir del diseño con retornos de retroalimentación (Modificado de Deutschman y col., 1996)

2.1.Reconocimiento de la necesidad

En el sistema educativo de la UNAM existe por tradición la visita presencial a alguna de las plantas de generación eléctrica. En una visita presencial la mayoría de los elementos y procesos de interés como los álabes de las turbinas, el paso de vapor, el movimiento del eje de la turbina y su acoplamiento al generador eléctrico se encuentran enfrascados en un sistema del cual solo se puede observar su exterior. Las limitantes respecto al análisis específico de cualquiera de los procesos son muy grandes a excepción de que alguno de los elementos se encuentre expuesto debido a un paro en la planta por mantenimiento, en cuyo caso, no se verá el sistema completo en funcionamiento.

Debido al alto contenido de información en cada uno de los procesos existe una tendencia a separar de manera independiente cada paso de la generación con el fin de facilitar el aprendizaje. La Figura 2.2 muestra la segmentación del proceso completo de generación, la energía generada en las plantas es usada para encauzar a la turbina algún tipo de fluido con alto contenido energético en donde se transforma en energía mecánica (movimiento) que hace girar el alternador generando la electricidad.

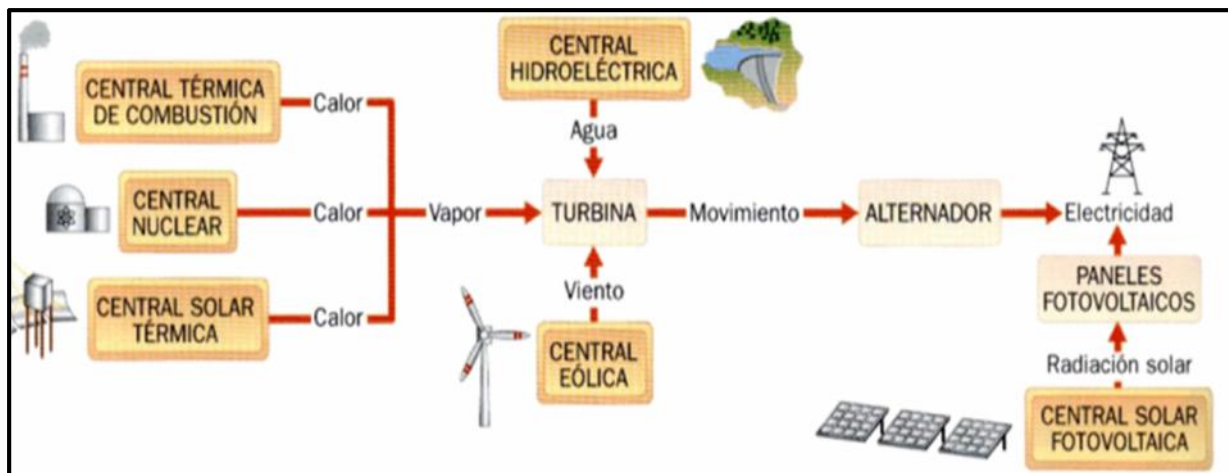


Figura 2.2 Diagrama de producción de electricidad (SNMPE, 2010)

Toda esta serie de procesos son en un principio estudiados de manera independiente, (tipos de energía, termodinámica, maquinas térmicas, inducción electromagnética, maquinas eléctricas, etc.) concibiendo un enfoque irreal en el que cada proceso es autónomo y no como un proceso con un solo fin: Prestar el servicio público de energía eléctrica con criterios de suficiencia, competitividad y sustentabilidad (CFE, 2012).



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

Es importante recalcar que todo el proceso de generación se encuentra constantemente conectado a la demanda real de electricidad, por lo que resulta inverosímil la modificación de alguno de los parámetros de la planta o de cualquier subestación para su experimentación.

De aquí nace la necesidad de crear prototipos a nivel laboratorio para la representación real, acertada y completa de la producción y consumo de energía eléctrica en la modernidad, teniendo un principio de funcionamiento del proyecto fidedigno al industrial existente y lo más importante: con parámetros modificables y cuantificables para su experimentación. Algunos elementos propios del proceso de generación no son necesarios a nivel laboratorio (sistemas de lubricación, refrigeración, líneas de transmisión, etc.) por lo que se prescindirán en el proyecto.

2.2. Posibilidades y limitantes del proyecto

Al ser un prototipo de diseño nuevo no se tienen bases experimentales, se usarán de referencia las prácticas realizadas en turbinas a nivel industrial. Son los recursos que se le destinarán y las limitaciones físicas-mecánicas las que darán un molde real a la ingeniería, para ello es necesario hacer una evaluación inicial de todos sus elementos y si son aptos y/o bastos para los objetivos antes planteados. Una vez estudiando y estableciendo los tipos de turbina que se puedan construir la única limitante será la creatividad con la que se desenvuelva el diseño.

Una vez que se hayan establecido los componentes de la turbina y de generación de electricidad existe una etapa muy importante en el diseño que se ha obtenido a través de retroalimentaciones, el más importante es el acoplamiento del eje de la turbina al eje del alternador, al no ser un caso de estudio experimental solo son plasmados los diseños finales.

Existen muchas variables termodinámicas que dependen de las propiedades del vapor que se use en la turbina, al no contar con especificaciones detalladas del vapor no se realizarán caracterizaciones respecto a variables termodinámicas. Uno de los parámetros más importantes y el cual será la guía para el proyecto es la potencia que tendrá la turbina, dado por:

$$P = V * I \quad (2-1)$$

Dónde:

V = Voltaje nominal I = Corriente nominal



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

Las principales variables de este proyecto como voltaje nominal y corriente nominal son determinadas con base a las especificaciones de sistemas ya estandarizados y de uso común- Se usaran los rangos del sistema automotriz debido a su bajo costo y su facilidad de adquisición, las variables restantes serán consecuentes de estas dos.

Se usará un alternador comercial que entrega un voltaje nominal de entre 13.8 y 14.4 voltios. Dentro de esta denominación existe una gran variedad de alternadores capaces de entregar arriba de 80 Ampere hora, el modelo exacto será determinado conforme a las necesidades del sistema eléctrico, siempre buscando el ahorro de energía en distintas formas (calorífica, mecánica y eléctrica).

En las centrales eléctricas la corriente generada es transformada aumentando su tensión (alta tensión) para ser enviada a la ciudad con las menores pérdidas posibles por efecto Joule, la turbina será construida con el fin de ser mostrada como un sistema completo por lo que el proceso de transmisión no se llevará a cabo. Los alternadores comerciales incluyen un sistema de rectificación y regulación en su fabricación, por lo que se usará una batería de CD de 12V nominales que alimentará todo el sistema eléctrico. Se buscará utilizar la menor cantidad de energía en el segmento eléctrico, con el fin de reducir la corriente mínima de funcionamiento.

Basados en uno de los grandes productores de turbinas (ALSTOM, 2010).

Componentes básicos de una turbina de vapor:

- Rotor y álabes
- Eje de turbina
- Material rodante

Los elementos para la generación de electricidad:

- Generador de electricidad (alternador)

Se le añaden los dispositivos necesarios para su uso por el consumidor final,

- Inversor
- Conector a 127VCA
- Conector USB

Para experimentar y comprobar mediciones se agrega la parte de instrumentación:

- Voltímetro
- Amperímetro
- Termómetro
- Tacómetro

Para mayor confiabilidad del aparato y por medidas de seguridad se decide incluir:

- Batería de respaldo
- Paro de emergencia

2.3. Componentes básicos de la turbina

Hoy en día, existen muchos tipos de turbinas de vapor que trabajan en condiciones súper críticas con presión de vapor por encima de los 250 bar y 600°C, estas compiten con el motor diésel y en las grandes potencias es el motor preferido, pero la turbina más ilustrativa para el funcionamiento de todas ellas es la turbina De Laval, la cual es una turbina axial de acción por lo que se usará de punto de partida. La Figura 2.3 representa una turbina de acción de un solo escalonamiento, en la tobera se expansiona el vapor incrementando su energía cinética, la velocidad de salida del vapor depende de la presión y temperatura del mismo antes de la tobera, en los álabes el vapor cede su energía cinética obteniendo energía útil (trabajo) en el eje de la máquina. Los álabes están fijos en el disco, que en conjunto forman el rotor o rodete de la turbina (Mataix, 2000).

En las turbinas de vapor, como en todas las turbomáquinas, el rotor es la parte más importante, es el intercambiador entre la energía del vapor y la energía mecánica. La turbina de vapor es un motor de combustión externa. La combustión se realiza en la caldera que es un intercambiador externo de calor y los gases de combustión no se mezclan con el fluido de trabajo. (Mataix, 2000).

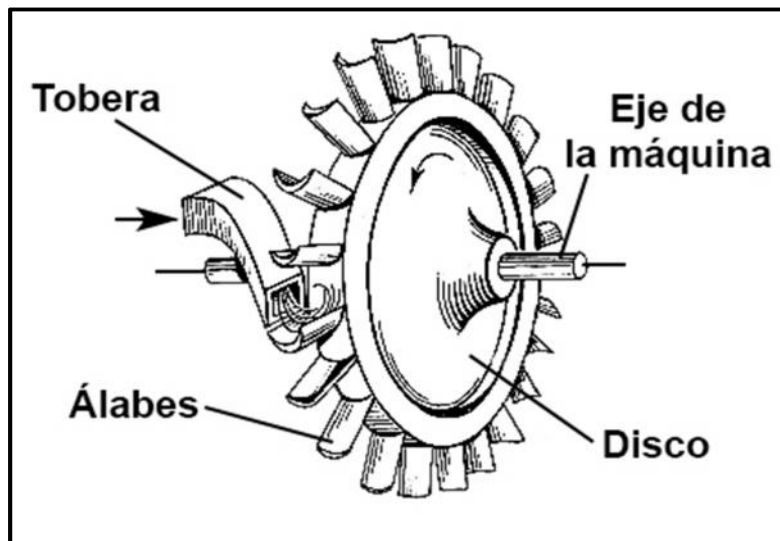


Figura 2.3 Esquema de una turbina De Laval (Mataix, 2000)

2.3.1. Álabes

- a) También conocidas como paletas o aspas móviles, estas piezas son montadas de manera tangencial al rotor, pueden ser fabricados de distintos materiales, siempre buscando soportar los esfuerzos mecánicos, térmicos y corrosivos (Alcaraz, 2013), para el caso de turbinas de acción se usa un resumen de recomendaciones basadas en la experiencia de turbinas ya construidas, existen varios elementos importantes que se ilustran en la Figura 2.4.
- b) *Espesor de álabe a la entrada y a la salida S_1, S_2* . El álabe no puede ser excesivamente afilado por cuestiones de rigidez, en las turbinas suelen estar comprendidos entre 0.4 y 1.3 mm aunque pueden ser de hasta 2.5mm, el espesor de la tobera S_t suele ser mayor.
- c) *Ancho de los álaves a* . suele ser $a < \frac{1}{10} l$ pudiendo llegar $a = l/2$.
- d) *Paso t* . Es variable según el tamaño de la turbina, la altura de los álaves y el valor de los ángulos, suele oscilar entre 10 y 100 mm. La relación entre ancho/paso debe estar entre 1 y 1.7.

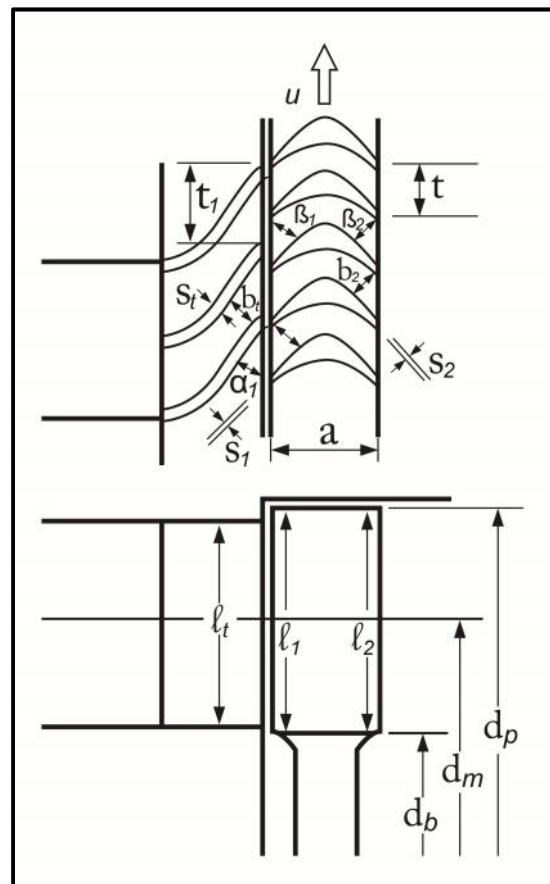


Figura 2.4 Esquema de álaves de acción (Mataix, 2000)

a) Álabes de acción

En un diseño de la curvatura de los álabes de una turbina de acción (Figura 2.5) se trazan dos líneas paralelas a la distancia “a” y a partir de la perpendicular se construye el ángulo β'_1 el segmento $AO=R$ viene dado por:

$$a = R \cdot \cos \beta'_1 + R \cdot \cos \beta_2 \quad (2-2)$$

En donde:

$$R = \frac{a}{\cos \beta'_1 + \cos \beta_2} \quad (2-3)$$

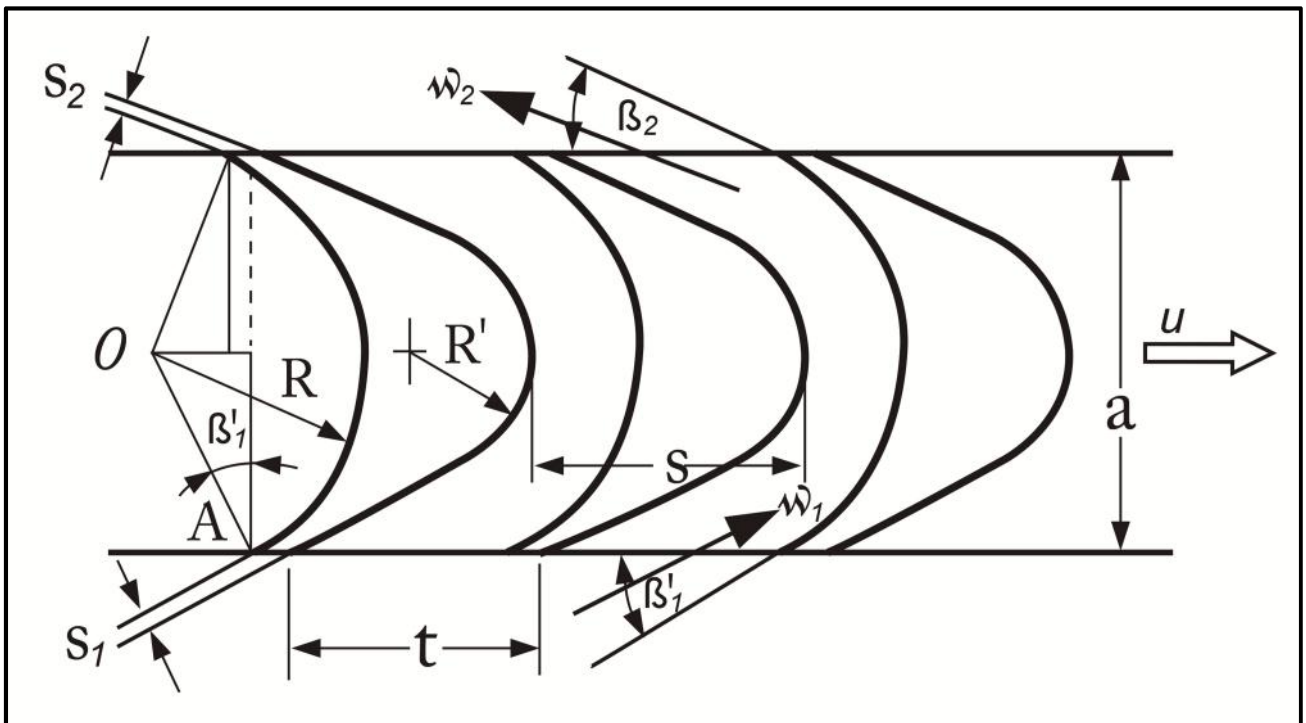


Figura 2.5 Construcción de un álabes de acción (Mataix, 2000)

b) Álabes de reacción

Para los álabes de reacción el conducto entre ellos debe ser suavemente convergente y por tanto el ancho menor al de la salida, la Figura 2.6 muestra el diseño de los álabes, se caracteriza el ancho de la entrada por los círculos cuyo diámetro es d_2 a la entrada y d_1 a la salida. El diseño de la parte convexa es más crítico, la curvatura debe ser continua. Para el diseño se trazan dos paralelas situadas a distancia “a”, por dos puntos “A” y “C” se trazan las tangentes a la parábola “AO” y “CO” con ángulos:

$$\beta_A \cong \beta'_1 \quad \text{y} \quad \beta_C \cong \beta_2 - \gamma \quad \text{donde} \quad \gamma \cong 7^\circ \quad (2-4) \text{ y } (2-5)$$

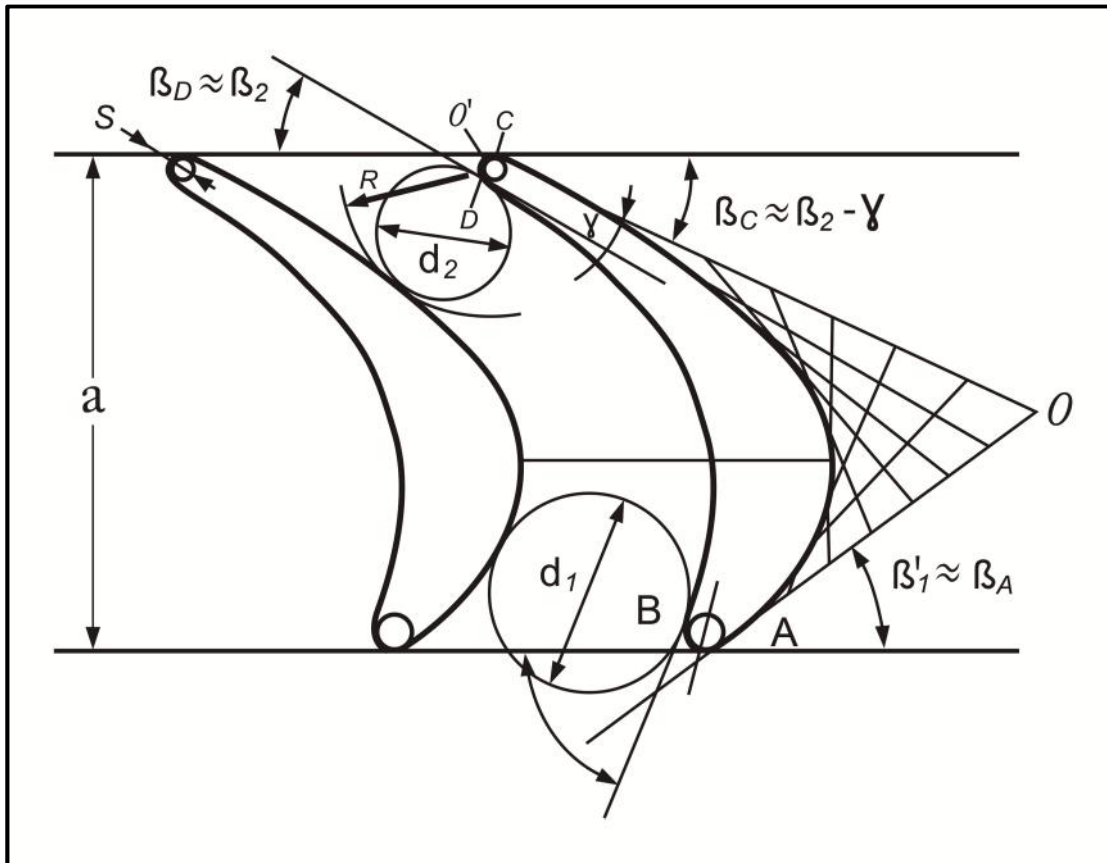


Figura 2.6 Construcción de álabe de reacción (Mataix, 2000)

La posición relativa de los puntos “A” y “C” y el ángulo β_c se fijan mediante tanteos, de manera que la parábola sea tangente al círculo trazado con centro en O' y con radio

$$R = d_2 + \frac{S_2}{2} \tag{2-6}$$

Haciendo:

$$d_2 \cong 1.04 t \sin \beta_2 \tag{2-7}$$

Para trazar la parábola se dividen los segmentos “AO” y “CO” en igual número de partes y se unen, a continuación se traza la figura que forma la parte cóncava del perfil BD, puede ser una parábola o un círculo de manera que el canal entre los dos álabes sea suavemente convergente. Las turbinas de reacción antiguas tenían bordes afilados como las turbinas de acción. Posteriormente los fabricantes han tendido a redondear el borde de ataque (perfil de entrada), este borde disminuye el rendimiento de la turbina en el punto nominal, pero aminora las pérdidas de choque en cargas distintas a la nominal y aumenta el rendimiento de la turbina que con frecuencia funcionara a carga variable (Mataix, 2000).



2.3.2. Eje de la turbina

El eje es la barra giratoria encargada de transmitir la potencia entre sus extremos mediante elementos fijos a él (Dias del Castillo, 2011), en este caso la potencia del disco al alternador. También conocido como flecha o árbol su diseño consiste básicamente en la determinación del diámetro correcto del eje para asegurar rigidez y consistencias satisfactorias cuando el eje transmite potencia en diferentes condiciones de carga y operación (Hall y col., 1990).

En el eje de la turbina actúan:

- a) El momento de torsión (M_t) correspondiente a la potencia transmitida por el eje, será:

$$M_t = \frac{P_a}{\omega} \quad (2-8)$$

Donde P_a – Potencia transmitida.

ω – Velocidad en rad/s

Para diferentes unidades:

$$Pot = \frac{M_t * n}{63000} \quad Pot = \text{hp}; n = \text{rpm}; M_t = \text{lb} * \text{plg} \quad (2-9)$$

$$Pot = \frac{M_t * n}{71600} \quad Pot = \text{C.V.}; n = \text{rpm}; M_t = \text{Kg} * \text{cm} \quad (2-10)$$

$$Pot = \frac{M_t * n}{9550} \quad Pot = \text{kW}; n = \text{rpm}; M_t = \text{N} * \text{m} \quad (2-11)$$

El esfuerzo máximo de torsión es:

$$\tau = \frac{M_t * D}{2J} \quad (2-12)$$

Dónde:

τ = Esfuerzo máximo (dependiendo el material)

D = Diámetro del eje

J = Momento polar de la inercia, que para un eje solido es:

$$J = \frac{\pi * D^4}{32} \quad (2-13)$$

Al sustituir la ecuación (2-13) en la ecuación (2-12) obtenemos:

$$\tau = \frac{16M_t}{\pi D^3} \quad (2-14)$$

De donde se obtiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{16 M_t}{\pi * \tau}} \quad (2-15)$$

- b) El momento de flexión correspondiente al peso del rotor es calculado por el peso del rotor y todos los elementos montados en el eje.

Se calculan las reacciones aproximadas en la Figura ubicando R_A como el punto inicial del eje (montado del rotor) y R_C el final del eje (acoplamiento al alternado) con un peso de 2kg del rotor y una fuerza de 10 Kg en dirección vertical por el movimiento del alternador, (un cálculo más aproximado se hará una vez definidos todos los elementos de la turbina de vapor).

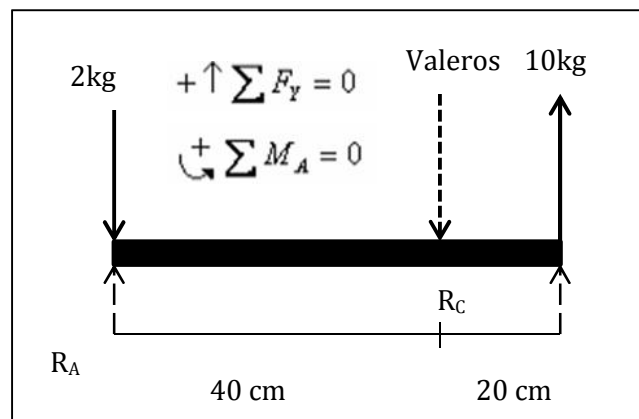


Figura 2.7 Esquema de fuerzas del eje de la turbina

Para

se tiene: $\curvearrowright \sum M_A = 0$

$$-2(0) + R_C(40) + 10(60) = 0$$



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

De donde

$$RC = -1.5 \text{ kg}$$

Para $+\uparrow \sum F_Y = 0$ Se tiene:

$$RA - 2 - 1.5 + 10 = 0 \quad \text{de donde } RA = 6.5 \text{ kg}$$

Todas estas fuerzas son ejercidas en el ancho del rotor y en el de los valeros, para facilitar su estudio se usara el promedio de 1 cm por lo que el momento de estas fuerzas será de las mismas cantidades con unidades de momento (kg*cm).

- c) El empuje axial correspondiente a la fuerza que actúa sobre el rotor en dirección del eje.

$$\sigma = K_t \frac{P}{A} \quad (2-16)$$

Existen diferentes ecuaciones para el diseño de ejes, la más aceptada es la ecuación propuesta por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (SAIM que por sus siglas en ingles es ASME, American Society of Mechanical Engineers) para un eje hueco que combina torsión, flexión y carga axial, aplicando la ecuación del esfuerzo cortante máximo modificado mediante la introducción de factores de choque, fatiga y columna:

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi S_S (1-K^4)} \sqrt{\left[K_b M_b + \frac{\alpha F_a d_o (1+K^2)}{8} \right]^2 + (K_t M_t)^2} \quad (2-17)$$

Aplicando la ecuación 2-17 a un eje macizo con carga axial pequeña o nula, se reduce a:

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau} \sqrt{(K_b M_b)^2 + (K_t M_t)^2} \quad (2-18)$$

En la cual:

d = diámetro del eje

M_t = momento de torsión

M_b = momento de flexión

K_b = factor combinado de choque y fatiga, aplicado al momento flector

K_t = factor combinado de choque y fatiga, aplicado al momento de torsión



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

La Tabla 2.1 resume los momentos para cada una de las aplicaciones de carga:

Tabla 2.1 Factores de choque y fatiga (elaboración a partir de Hall y col., 1990)

Aplicación de carga	Momento flector	Momento de torsión
Para ejes en rotación	Kb	Kt
Carga aplicada gradualmente	1,5	1
Carga repentina (choque menor)	1,5 a 2,0	1,0 a 1,5
Carga repentina (choque fuerte)	2,0 a 3,0	1,5 a 3,0

Con la ecuación (2-18) se puede obtener un diámetro mínimo necesario para soportar la potencia transmitida.

2.4. Acoplamientos

Los acoplamientos se usan para conectar secciones de eje o para conectar el eje de una máquina conductora a una máquina conducida, esto permite una conexión permanente (Hall y col., 1990). En una turbina de vapor destinada al accionamiento de un alternador se deberá calcular el eje al caso más desfavorable del alternador en corto circuito, en que el momento de torsión puede llegar a exceder 10 veces al momento correspondiente a la potencia máxima de la turbina, las secciones más peligrosas corresponden al cojinete posterior y al acoplamiento de la turbina (Mataix, 2000).

Un eje, como un cuerpo rígido, tiene potencialmente seis grados de libertad (GDL) con respecto a un segundo eje. Sin embargo, debido a la simetría sólo cuatro de estos GDL son de interés. Esto lleva a desalineaciones axial, angular, paralela y torsional, que pueden ocurrir individualmente o combinados, y se presentan en los ensambles debido a las tolerancias de fabricación, o quizás ocurran durante la operación como resultado de los movimientos relativos de los dos ejes.

A menos que se tomen precauciones para alinear los dos ejes adyacentes, en las máquinas puede haber desalineación axial, angular y paralela. Las desalineaciones angulares ocurren dinámicamente, cuando la carga impulsada intenta guiar o demorar al impulsor. La Figura 2.8 muestra los cuatro tipos de desalineaciones que es necesario contemplar para una correcta alienación.

Se fabrican numerosos diseños de acoplamientos con tolerancia y cada uno ofrece una combinación de características diferentes. El diseñador generalmente encuentra el acoplamiento comercial adecuado para cualquier aplicación.

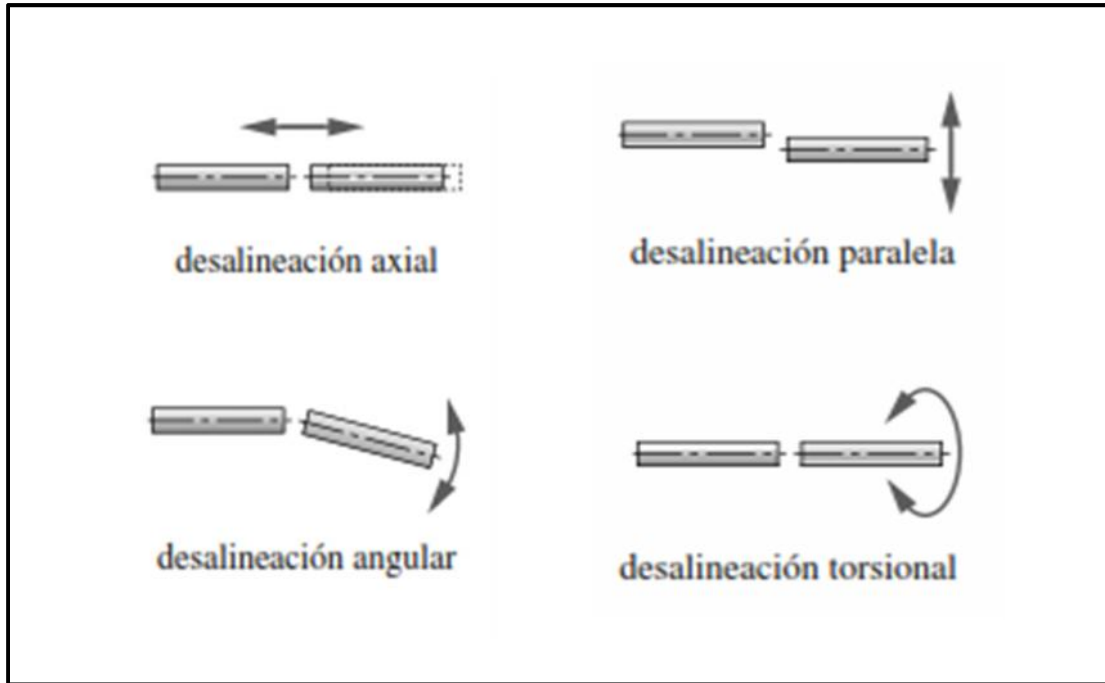


Figura 2.8 Tipos de desalineación en ejes (Norton, 2011)

Si el acoplamiento permite cualquier tolerancia torsional, se presenta un juego cuando el torque cambia de signo. Esto es indeseable si lo que se necesita es una fase precisa. En un acoplamiento flexible sería deseable la tolerancia a la torsión, si el impulsor se debe aislar de cargas de choque o vibraciones de torsión grandes (Norton, 2011).

a) Acoplamientos rígidos

Los acoplamientos rígidos se usan en flechas colineales con buena alineación y sin permitir movimiento entre ellos algunos de ellos son:

Acoplamientos de tornillo prisionero. Éstos utilizan un tornillo prisionero duro que se incrusta en el eje para transmitir torque y cargas axiales. Éstos no son recomendables salvo para aplicaciones con cargas ligeras y se pueden soltar con la vibración (Mataix, 2000).

Acoplamientos acuñaados. Usan cuñas estándar, pueden transmitir un torque considerable. Con frecuencia se emplean los tornillos prisioneros (opresores) junto con una cuña, ubicando el tornillo a 90° de la cuña. Para operar adecuadamente contra la vibración, se utiliza un tornillo prisionero con punta de copa que se incrusta en el eje. Para mayor seguridad, se debe hacer un orificio poco profundo en el eje debajo del tornillo, con la finalidad de proporcionar una interferencia mecánica contra deslizamiento axial en vez de confiar en la fricción.



Acoplamiento de sujeción. Los más comunes son los deslizantes de una o dos piezas, que se abrazan alrededor de los dos ejes y transmiten torque a través de la fricción. Un acoplamiento de bloqueo cónico utiliza una hendidura en forma de cono, que está apretada entre el eje y el alojamiento del acoplamiento cónico para sujetar el eje (Norton, 2011).

b) Acoplamientos flexibles

Los acoplamientos flexibles se dividen en varias subcategorías, los principales son:

Acoplamiento de quijada. Tienen dos mazas (frecuentemente idénticas) con quijadas prominentes. Las quijadas se traslapan axialmente y se traban torsionalmente a través de un inserto flexible de caucho o un metal blando. Las holguras permiten algo de desalineación axial, angular y paralela.

Acoplamiento de disco flexible. Son similares a los acoplamientos de quijada, donde sus dos mazas están conectadas por un elemento con tolerancia (disco), como un elastómero o un resorte metálico. Esto permite desalineación axial, angular y paralela, además de alguna tolerancia a la torsión con un poco o nada de juego.

Acoplamiento de engrane y ranura. Utilizan engranes externos con dientes rectos o curvos, que permiten movimientos axiales sustanciales entre los ejes y, según la forma del diente y las holguras, también absorben pequeñas desalineaciones angulares y paralelas. Tienen gran capacidad de torque por el número de dientes engranados.

Acoplamiento de eslabón o acoplamiento de Schmidt. Conectan dos ejes a través de una red de eslabones, permiten una desalineación paralela significativa sin cargas laterales, o pérdidas de torque y sin juego. Algunos diseños permiten pequeñas cantidades de desalineación angular y axial. Se utilizan con frecuencia donde se necesitan grandes ajustes paralelos o movimientos dinámicos entre los ejes.

Acoplamiento helicoidales y de fuelle. Son diseños de una sola pieza que usan sus deflexiones elásticas para permitir desalineaciones axiales, angulares y paralelas, con un poco de juego o sin él. Los acoplamientos helicoidales se fabrican con un cilindro sólido metálico cortado con una ranura helicoidal para incrementar su flexibilidad.

Los acoplamientos de fuelle de metal se fabrican con una hoja de metal delgada soldando una serie de arandelas huecas juntas, moldeando hidráulicamente un tubo dentro de la forma, o colocando un recubrimiento electrolítico grueso sobre un mandril. Dichos acoplamientos tienen una capacidad de torque limitada comparados con otros diseños, pero ofrecen cero juego y alta rigidez a la torsión, en combinación con desalineación axial, angular y paralela (Norton, 2011).



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

La Tabla 2.2 muestra un resumen de las características de los acoplamientos:

Tabla 2.2 Características de varios tipos de acoplamientos (Norton, 2011)

CLASE	Desalineación Tolerada				Comentarios
	Axial	Angular	Paralela	Torsional	
Rígida	Grande	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Requiere alineación precisa
Quijada	Ligera	Ligera (<2°)	Ligera (3% d)	Moderada	Absorción de choque
Engrane	Grande	Ligera (<5°)	Ligera (<1/2% d)	Ninguna	Juego ligero, gran capacidad de torque
Ranura	Grande	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Juego ligero, gran capacidad de torque
Helicoidal	Ligera	Grande (20°)	Ligera (<1% d)	Ninguna	Una pieza compacta sin juego
Fuelle	Ligera	Grande (17°)	Moderada (20% d)	Ninguna	Sujeto a falla por fatiga
Disco Flexible	Ligera	Ligera (3°)	Ligera (3% d)	De ligera a Ninguna	Absorción de choque, sin juego
Eslabón (Schmidt)	Ninguna	Ligera (5°)	Grande (200% d)	Ninguna	Sin juego; sin cargas laterales sobre el eje
Hooke	Ninguna	Grande	Grande (en pares)	Ninguna	Juego ligero; variación de rapidez
Rzeppa	Ninguna	Grande	Ninguna	Ninguna	Velocidad constante

a) Rodamientos

Los términos cojinete de contacto rodante, cojinete antifricción y cojinete de rodamiento se emplean para describir la clase de rodamiento en la cual se transfiere la carga principal mediante elementos que experimentan contacto rodante en vez de contacto deslizante. En un cojinete de rodamiento, la fricción inicial aproximadamente duplica la fricción de operación. La carga, la velocidad y la viscosidad de operación del lubricante afectan las características de fricción de un cojinete de rodamiento.

Los cojinetes se fabrican para soportar cargas radiales puras, cargas de empuje (axiales) puras o una combinación de ellas. Las partes de un rodamiento de bolas se ilustran en la Figura 2.9, las cuatro partes esenciales son: el anillo exterior, el anillo interior, las bolas o balines (elementos rodantes) y el separador (Norton, 2011).

Los rodamientos tienen dos funciones principales: Transfieren el movimiento, es decir, apoyan y guían componentes que giran entre sí y transmiten fuerzas. Ambos diseños están disponibles como rodamientos de bolas o como rodamientos de rodillos. La elección del diseño de los rodamientos depende de cada aplicación (NSK, 2017)

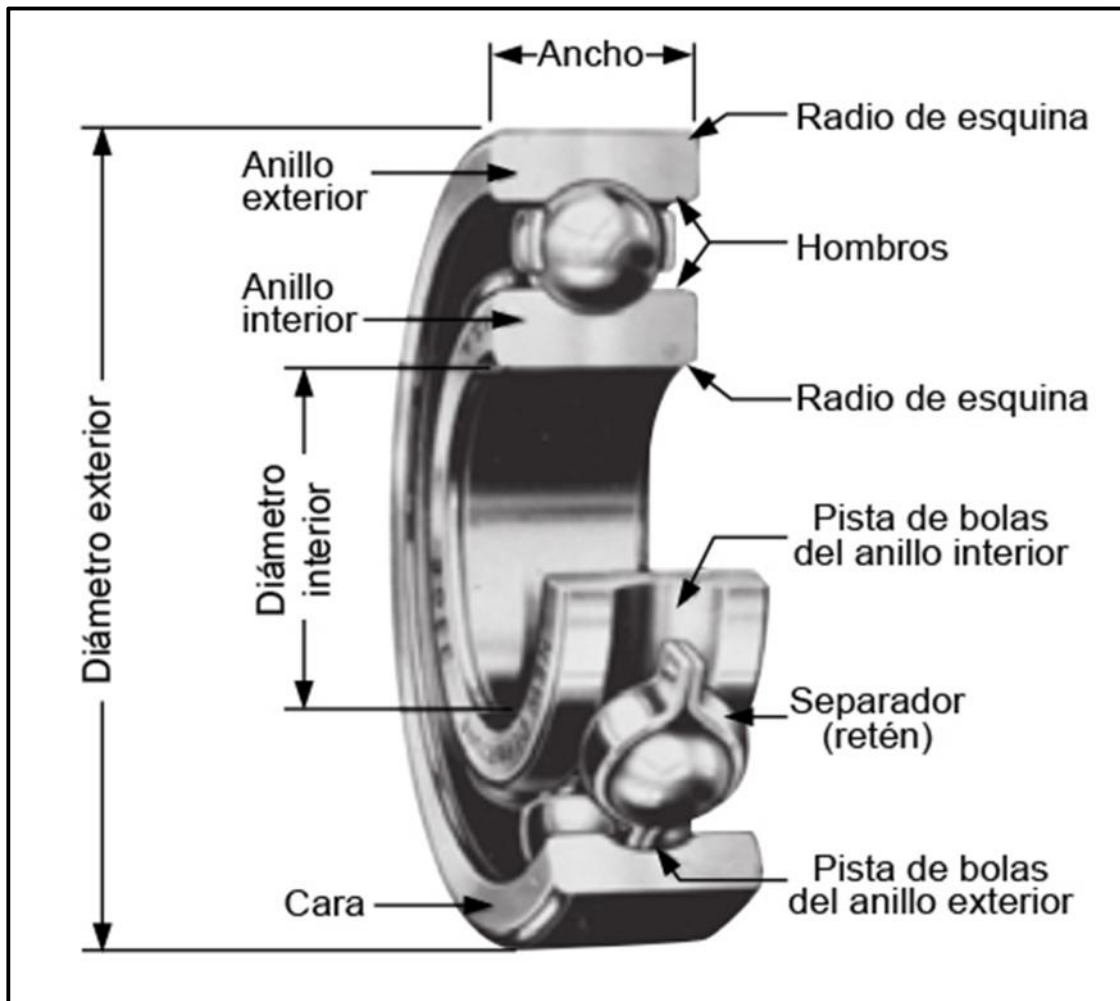


Figura 2.2 Partes de un cojinete de bolas (Norton, 2011)

b) Chumacera

El soporte del eje al que se le aplica carga en la dirección radial se le conoce como chumacera, el eje gira mientras que la chumacera esta fija (Deutschman y col., 1996).

2.5. Generador de electricidad

El vapor que pase a través de la turbina creará un movimiento en el eje que se acoplará al eje del generador, este será el vínculo entre energía mecánica y energía eléctrica del proyecto, el generador síncrono o alternador es una máquina síncrona que se utilizan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna (CA). Actualmente el alternador ha sustituido completamente al generador de CD, debido a que el primero es más eficiente para la producción de energía (Chapman, 2012) y será utilizado para generar la corriente necesaria para cargar una batería que alimentara el circuito eléctrico.

Un alternador está constituido principalmente por dos elementos principales: el estator (soporte y núcleo) y el rotor, los cuales se muestran en la Figura 2.10.

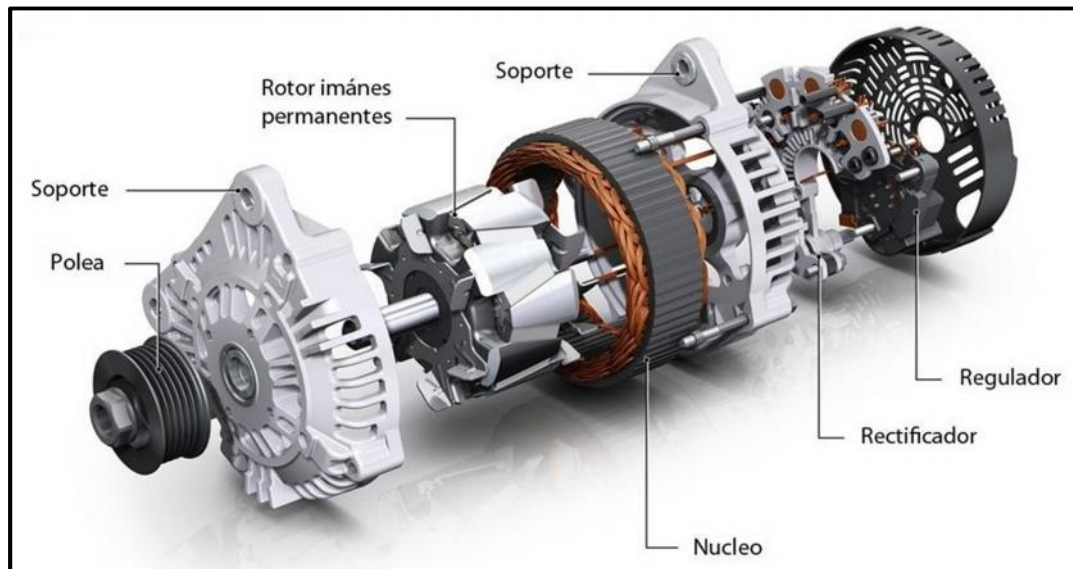


Figura 2.10 Componentes principales de un alternador (Arpem, 2011)

El funcionamiento del rotor comienza cuando se aplica corriente directa al devanado del rotor, está formado por dos piezas dentadas que se montan sobre el eje de rotación con ajuste a presión por lo que girarán con él. Estas piezas dentadas abrazan una bobina central que requiere de un dispositivo que le proporcione corriente directa en el devanado aún cuando este se encuentre girando. Esto se logra mediante los aros deslizantes también llamados anillos colectores, que conducen la electricidad de excitación que proviene de la batería a la bobina central del rotor, formando un potente electroimán.

Este electroimán convierte los "dedos" de las tapas dentadas del rotor en imanes de polaridad permutada (uno N y el que le sigue S), generando así el llamado rotor de imanes permanentes. Al girar la flecha del rotor por el movimiento de la turbina hace que este electroimán sea rotacional a la par con su campo magnético.

La magnitud del campo es proporcional a la cantidad de corriente que circula por el devanado. Posteriormente se induce cierto voltaje V_{ind} en el devanado del estator generalmente un alternador automotriz posee en el rotor 6 pares de polos. El polo magnético fluye entre los pares de polos, generando que éste varíe con respecto al tiempo (sinusoidal). Por esta razón el rotor se construye con láminas delgadas para evitar pérdidas por corrientes parásitas (Chapman, 2012). El estator es un devanado en el cual se induce voltaje de CA, debido a que el campo magnético varía con respecto al tiempo, existen tres devanados estáticos separados entre sí 120° eléctricos. Esto indica que se inducen tres voltajes desfasados 120° entre sí (energía trifásica).



2.5.1. Relación entre frecuencia eléctrica, mecánica y voltaje inducido del alternador

La relación que existe entre la frecuencia eléctrica de los voltajes inducidos (f_e) y la velocidad de rotación de la máquina (f_m) se tiene:

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \quad (2-19)$$

Dónde:

⇒ P es el número de polos magnéticos, el cual siempre debe ser un número par.

La frecuencia eléctrica está dada en Hz (ciclos por segundo), se requiere convertir la velocidad mecánica de rotación del alternador (revoluciones por minuto) en Hz. Esto se logra mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{n_m}{60} \quad (2-20)$$

Dónde:

⇒ n_m es la velocidad del campo magnético en revoluciones por minuto.

Sustituyendo (2.19) en (2.20) se encuentra la relación correcta entre la frecuencia eléctrica y la velocidad de rotación del alternador:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2-21)$$

El voltaje inducido en los devanados estatóricos se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{ind} = N_c \Phi \omega_m \sin(\omega_m t) \quad (2-22)$$

Dónde:

- ⇒ N_c es el número de vueltas del devanado estatórico,
- ⇒ Φ es el flujo magnético en Webers [Wb], que pasa a través del devanado y,
- ⇒ ω_m es la velocidad angular de rotación del campo magnético



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

Se tiene que Φ y w_m en (2-22) dependen de:

$$\Phi = dl B_m \quad (2-23)$$

$$W_m = \frac{2w_e}{P} \quad (2-24)$$

Dónde:

- ⇒ d es el diámetro del estator del alternador,
- ⇒ l es la longitud del devanado en metros [m],
- ⇒ B_m es la densidad de flujo pico del campo magnético en Teslas [T] y,
- ⇒ w_e es la frecuencia angular eléctrica en radianes por segundo [Rad/S].

Sustituyendo (2-23) y (2-24) en (2-22), se encuentra una nueva ecuación para el voltaje inducido.

$$V_{ind} = \frac{2N_c dl B_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t\right) \quad (2-25)$$

Dónde:

$$\Rightarrow w_e = 2\pi f_e .$$

La ecuación final (2-25) da la relación que existe en las variables, se observa que la frecuencia eléctrica de V_{ind} depende de la frecuencia mecánica del alternador. Por otro lado, la magnitud del voltaje inducido incrementa de acuerdo a lo siguiente (Leslie Goings, 1972):

- I. V_{ind} aumenta si la velocidad de rotación (w_m) aumenta
- II. V_{ind} aumenta si la densidad del flujo magnético (Φ) se incrementa. Esta depende a su vez de los siguientes parámetros:
 - a) El número de vueltas (N_c) y el tipo de alambre utilizado en el devanado del estator.
 - b) El hueco de aire que existe entre los polos magnéticos del rotor y el estator.
 - c) El voltaje aplicado al devanado del rotor que existe entre los aros deslizantes.



CAPÍTULO 2. BASES DE DISEÑO DE LA TURBINA

Dado que los alternadores automotrices generan energía trifásica, se requieren de tres devanados en el estator, separados 120° eléctricos entre sí. La conexión de estos devanados puede ser mediante dos formas: delta o estrella (Hernández, 2007). Por lo tanto, en un sistema trifásico, los voltajes de fase inducidos son:

$$V_{\Phi a} = \frac{2N_c d l B_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t\right) \quad (2-26)$$

$$V_{\Phi b} = \frac{2N_c d l B_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t - 120^\circ\right) \quad (2-27)$$

$$V_{\Phi c} = \frac{2N_c d l B_m w_e}{P} \sin\left(\frac{2}{P} w_e t - 240^\circ\right) \quad (2-28)$$

El circuito eléctrico equivalente del alternador se muestra en la Figura 2.11, donde V_f , I_f , R_f y L_f son el voltaje, corriente, resistencia e inductancia (devanado) del rotor respectivamente. E_{A1} , E_{A2} y E_{A3} son los voltajes de fase inducidos. R_A y jX_S son la resistencia e inductancia del estator respectivamente. Tanto R_A como jX_S deben ser idénticos en las tres fases. De no ser así, las magnitudes de los voltajes de fase se ven afectadas (Hernández, 2007).

La tensión y frecuencia de la corriente alterna generada tienen mucho que ver con la velocidad de giro de la máquina. En los generadores comerciales están universalmente establecidas las siguientes velocidades:

- Para 50 Hz (red europea 400/230 V):
1500 r.p.m. (2 pares de polos) – 3000 r.p.m. (1 par de polos).
- Para 60 Hz (red americana 440/110 V):
1800 r.p.m. (2 pares de polos) – 3600 r.p.m. (1 par de polos).

El alternador como mínimo necesita un par de polos (1norte N + 1sur S), situados diametralmente opuestos para crear el campo magnético de excitación. Con la misma técnica pueden situarse nuevos pares de polos dando lugar a máquinas de 1-2-3-4-5, incluso más (antiguas centrales hidráulicas tenían ruedas polares de hasta 12 pares).

Los pares de polos en el proyecto son basados a una red americana de 110 V para revoluciones menores a los 3500 r.p.m.

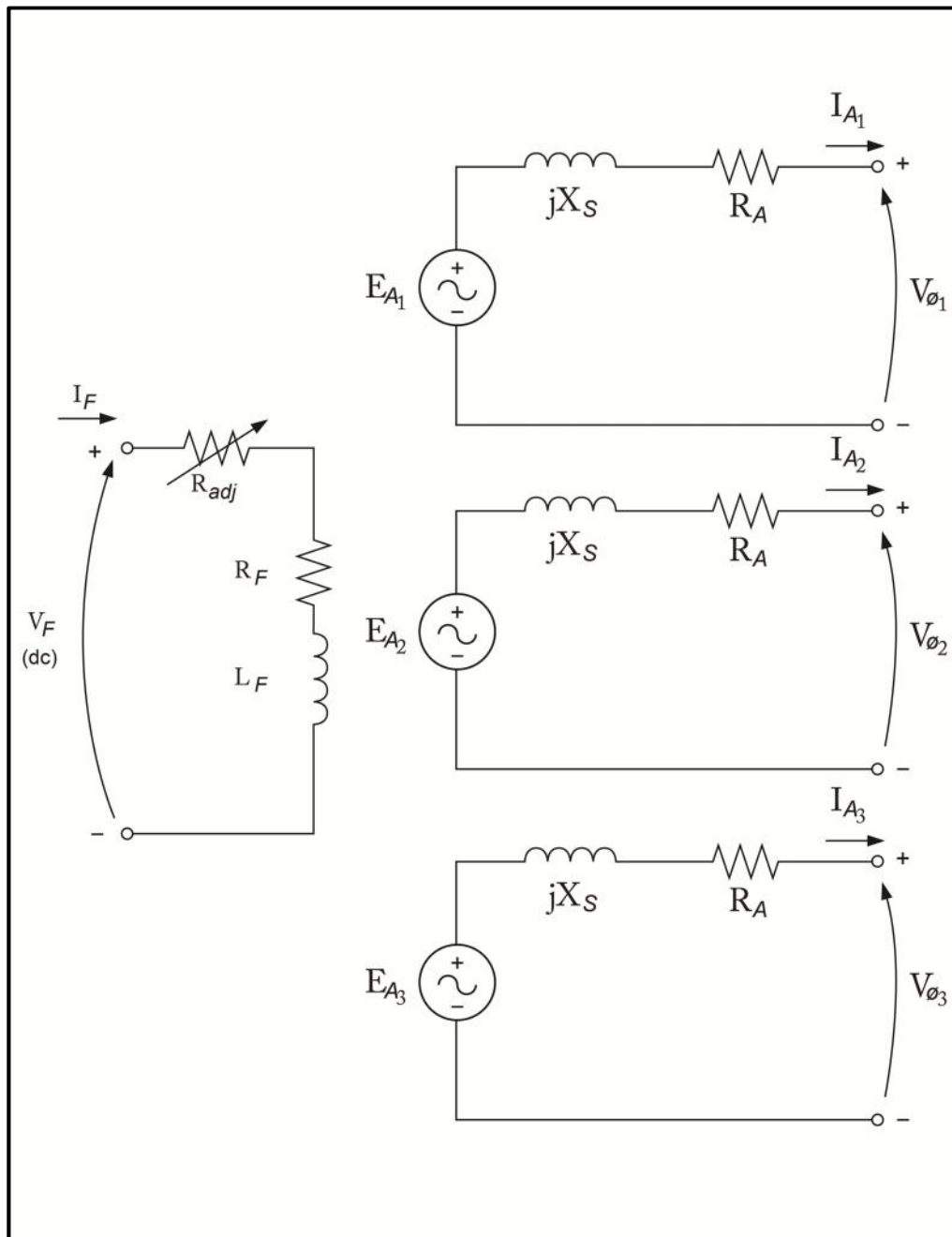


Figura 2.11 Circuito equivalente del alternador (Hernández, 2007)

Aplicando la ecuación para obtener 50 ó 60Hz (países europeos y americanos respectivamente), aparecen las posibles velocidades sincrónicas según el nº de pares de polos para el que se construya su bobinado como se indica en la Tabla 2.3. En donde observa que a mayor cantidad de polos menor RPM, lo cual puede ser ventajoso si no se cuenta con las velocidades necesarias, pero un número mayor de polos implica una maquina más grande, mayor cantidad de cobre necesaria para su construcción que se resume en una máquina más cara.



Tabla 2.3 RPM para 50 y 60 Hz según el número de polos (GEB, 2016)

FRECUENCIA	NUMERO DE POLOS					
	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS	8 POLOS	10 POLOS	12 POLOS
50 HZ	3000 RPM	1500 RPM	1000 RPM	750 RPM	600 RPM	500 RPM
60 HZ	3600 RPM	1800 RPM	1200 RPM	900 RPM	720 RPM	200 RPM

2.5.2. Esquema de generación de CD

La velocidad de giro determinará la frecuencia de la sinodal. Las grandes turbinas conllevan un regulador centrífugo que controla la variación de la velocidad de giro, este control de frecuencia en conjunto con un suministro controlado y estable de vapor proporcionan constancia en la velocidad y flujo de la turbina lo que incrementa la vida útil del rotor.

En este proyecto el implementar un regulador centrífugo haría inadmisibles la modificación de los parámetros de velocidad de giro para su experimentación, además de reducir el margen de la calidad de vapor que pueda admitir, haciendo la turbina más específica y elevando los costos en la producción de vapor, por lo que no se acondicionará ningún tipo de control en el giro.

Para corregir las variantes de frecuencia y voltaje a la salida del alternador será conectado a un puente de diodos rectificadores que convertirán la corriente alterna en corriente directa para cargar una batería y después utilizar como mejor se necesite. El esquema más ventajoso para este tipo de generación es el automotriz ya que es ampliamente usado lo que disminuye sus costos y facilita su adquisición, aunque existen ciertas variaciones.

En el esquema automotriz, el alternador es girado por una banda de hule conectada al cigüeñal del motor, se utilizará la fuerza de la turbina para este propósito, acoplando directamente el eje de la turbina con el eje del alternador para minimizar las pérdidas. La conversión a CD reduce los tipos de usos que se puedan hacer a la energía almacenada, por lo que se anexa un convertidor de CD/CA al esquema, esto se hará a través de un inversor de voltaje, sin que esto limite el uso de la CD.

2.5.3. Sistema de carga de la batería

La batería es un artefacto que genera corriente directa por medio de reacciones químicas. Este dispositivo se encarga de suministrar energía a todas las cargas eléctricas. Cuando la batería se encuentra totalmente cargada, genera un voltaje aproximado de 12.6 V de CD (Santini, 2012). Para lograr que la batería sea recargada por el alternador, se requiere un puente rectificador de diodos de onda completa. Esto se logra siempre y cuando el eje del alternador se encuentre girando. De esta manera, el alternador le inyecta corriente a la batería y a las demás cargas eléctricas. El sistema de carga de la batería se muestra en la Figura 2.12.

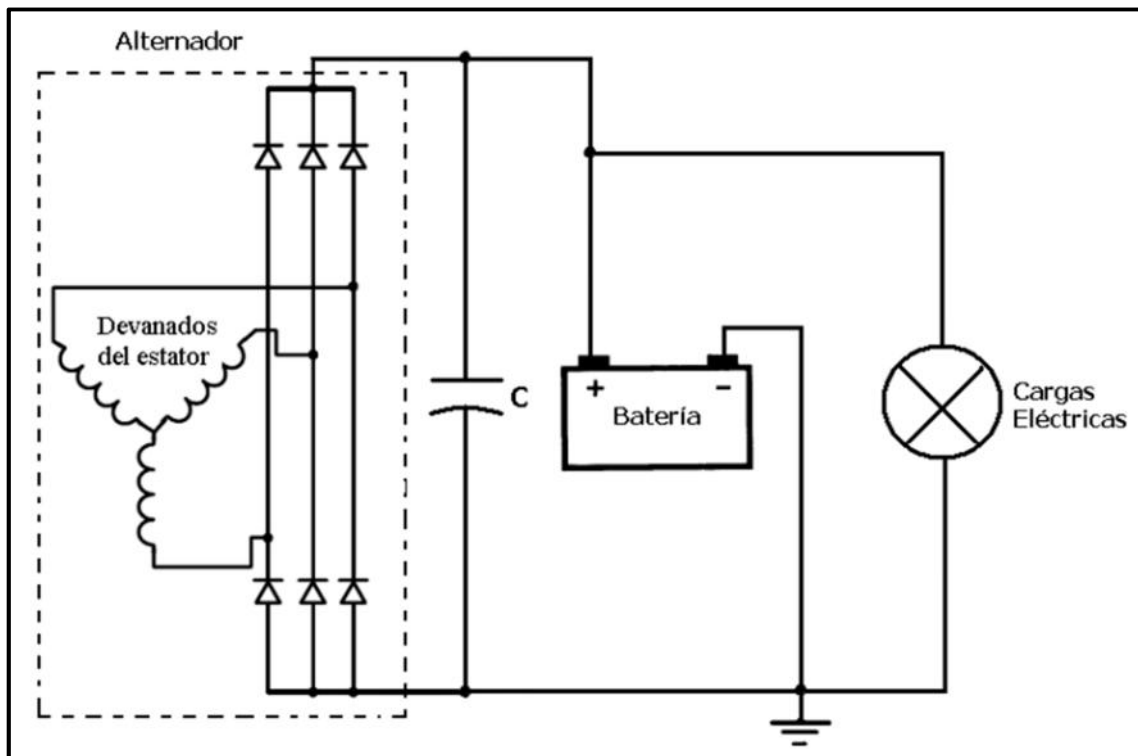


Figura 2.12 Esquema del alternador con batería y carga (Santini, 2012)

Para recargar a la batería, debe de existir un voltaje entre sus terminales mayor a 12.6 V y menor a 15.5 V (Santini, 2012). En un rectificador de onda completa trifásico, el voltaje promedio de salida está dado por:

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos(wt) d(wt)$$

(2-29)



Simplificando:

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (2-30)$$

Sustituyendo V_{cd} por los 14V en promedio necesarios para la carga, se obtiene el voltaje pico (inducido) de fase:

$$V_{cd} \approx 8.5[V]$$

Esto indica que el V_{in} debe ser igual a 8.5V, por lo que sustituyendo en la ecuación (2-25)

$$V_{ind} = \frac{2N_c dl B_m w_e}{P} = 8.5 V$$

Este es el valor que debe ser inducido para que la batería se suministre de energía correctamente. Ya que V_{ind} depende de la densidad de flujo pico y velocidad angular eléctrica (B_m y w_e), se debe regular la magnitud de estos para que voltaje inducido no sobrepase los límites de operación.

2.5.4. Regulador de voltaje

Para que el sistema eléctrico no presente sobre voltajes, se requiere controlar la cantidad de voltaje inducido en los devanados estatóricos. Esto lo hace un dispositivo llamado regulador. La regulación de voltaje tiene dos objetivos principales:

- I. Controlar el voltaje nominal de la batería (12.6V).
- II. Proteger a las cargas eléctricas distribuidas en toda la turbina, debido a que éstas operarán con el mismo voltaje de la batería.

La magnitud el voltaje inducido depende de la densidad máxima del campo magnético (2-25) ésta densidad, a su vez es directamente proporcional a la intensidad de corriente que pasa a través del devanado del rotor. De ahí que el voltaje inducido se pueda regular mediante la intensidad de corriente que pasa a través de la bobina del rotor. Anteriormente, la regulación de voltaje era por medio de resistencias variables (potenciómetros), con el objetivo de controlar la corriente de campo del rotor. Los reguladores que se utilizan actualmente, son fabricados con semiconductores (Hernández, 2007).

En la Figura 2.13 se muestra un esquema de un regulador electrónico conectado al sistema de carga. El puente rectificador de diodos convierte la CA generada en los devanados del estator en CD. El ciclo de trabajo del regulador depende del voltaje de CD sensado por la terminal A. Si el voltaje sensado está bajo (menor a 12.6V), el ciclo de trabajo del regulador incrementa. Esto es con el propósito de inyectar más corriente al devanado del rotor por medio de la terminal “F”. Por el contrario, si el voltaje sensado es alto, el ciclo de trabajo disminuye.

La terminal “S” monitorea el voltaje del estator, si este no se encuentra en movimiento tal voltaje no existirá y puede ser sensado por medio de la terminal I con una lámpara indicadora, que aunque no se usara en este proyecto es importante conocer su función en caso de futuros escalonamientos y/o mejoras en la parte de control y automatización de la turbina. El sensado de movimiento en esta primera versión se hará a través de un tacómetro digital que se explica en el capítulo de instrumentación.

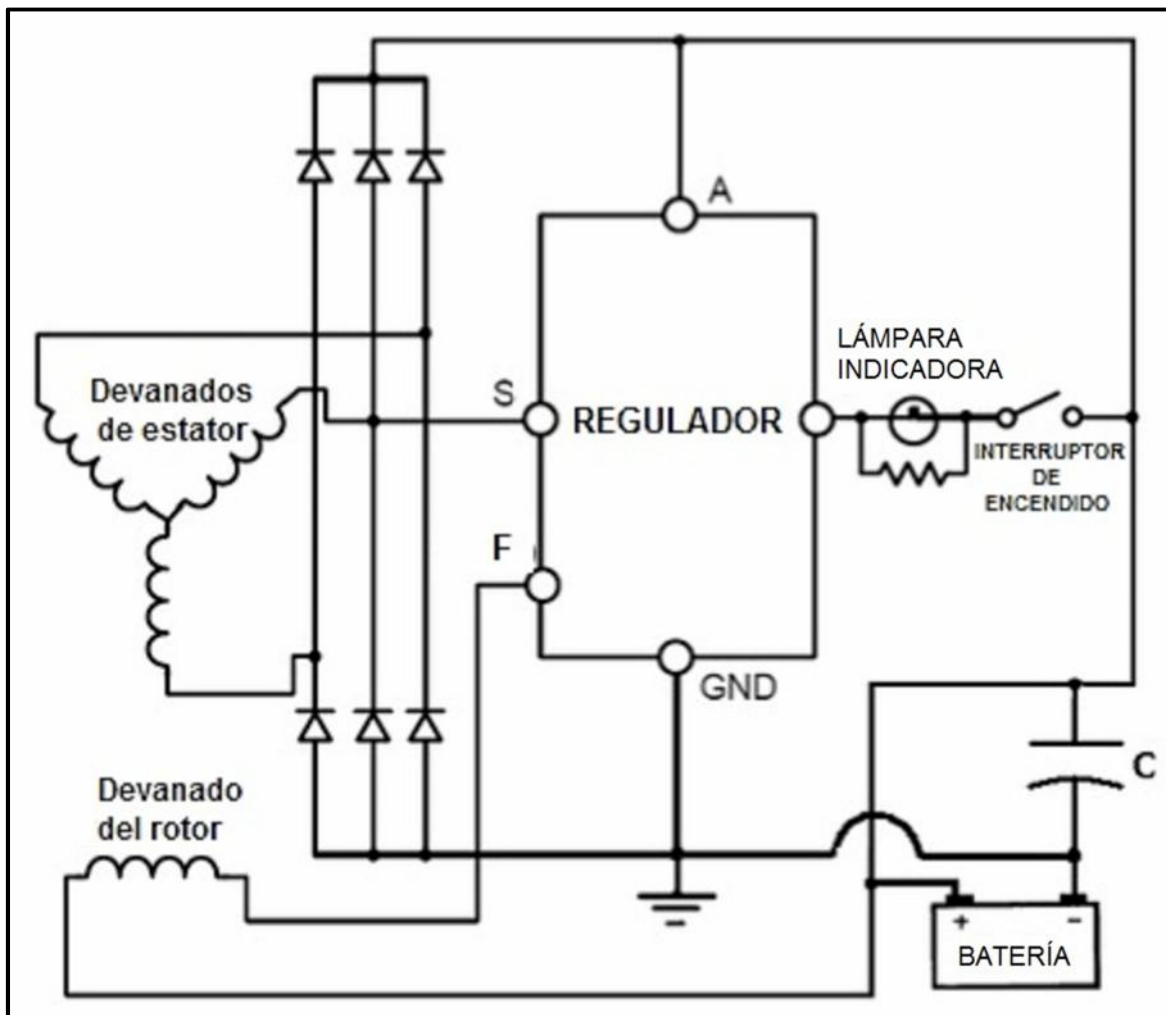


Figura 2.13 Esquema de un regulador electrónico conectado a un sistema de carga (Hernández, 2007)



2.5.5. Conversión de CD en CA (Inversor)

Un inversor es un dispositivo que se usa para la conversión de corriente directa, en corriente alterna, la tecnología que involucra es referente a la electrónica digital, al no ser un equipo usado para la generación de electricidad en los sistemas convencionales no se profundizara acerca de su teoría de funcionamiento, solo se hará mención y se enlistara en los instrumentos utilizados.

2.6. Instrumentación

Se llama instrumentación al conjunto de instrumentos y/o aparatos que hacen posible la medida de una variable física particular y, por extensión, también al conjunto de instrumentos de medida que permite seguir la evolución de un sistema físico, cualquiera que sea el número de variables físicas involucradas. La instrumentación como disciplina estudia las técnicas de diseñar, construir y utilizar correctamente los sistemas de medida (Planas, 2000).

La temperatura de toda la turbina es una importante variable a monitorear cuando se encuentre en operación, al ser una variable que determinara principalmente el vapor no se contempla para este diseño, pero se hace una enfática recomendación de agregar una medición de temperatura en la turbina por motivos de seguridad una vez que el suministro de vapor sea determinado.

Las variables a medir en este proyecto serán en el área mecánica y eléctrica, dentro de la instrumentación también se incluirá un respaldo hacia la batería y un paro de seguridad que se recomienda sincronizar a las medidas de seguridad que tenga el futuro suministro de vapor.

a) Instrumentación eléctrica

Las dos mediciones necesarias para el cálculo de potencia son el voltaje y la corriente que sale del alternador hacia la batería, para esto es necesario dos instrumentos:

- Voltímetro
- Amperímetro

Existen muchos aparatos que miden voltaje y amperaje en un mismo sistema, pero es necesario cambiar la modalidad del instrumento y hacer una reconexión, por lo que se usaran dos equipos por separados que quedaran fijos y darán mediciones en tiempo real.



b) Instrumentación mecánica

Las mediciones mecánicas más importantes es la velocidad de rotación de la turbina y la temperatura de la misma, para esto se usa:

- Termómetro
- Tacómetro

La medición de temperatura es necesaria en muchos puntos, además de la temperatura del vapor es necesario conocer la temperatura de los baleros y el eje, ya que esto sería un indicativo de problemas en la mecánica de la turbina, ya sea por rozamientos excesivos o por el uso prolongado de la turbina.

Es importante tener mediciones en los rodamientos mientras la turbina se encuentra en funcionamiento, por esta razón la manera más útil es con un termómetro a distancia, por lo que la manera más adecuada es un termómetro infrarrojo. La parte de velocidad de giro será con un tacómetro digital, este contara con un sensor que medirá la cantidad de vueltas por minuto la cual trabajara mientras la turbina se encuentre a una velocidad de operación nominal; junto con el amperímetro obtendremos en práctica el rango de revoluciones a las cuales produce su mínima y máxima potencia.

c) Medidas de seguridad

Uno de los instrumentos más importantes será el paro de emergencia, aunque por su configuración entrará más allá que una parte pasiva de la turbina ya que será parte del control al detener o encender la turbina, la manera ideal de su conexión sería conectar el paro de emergencia para que cerrará el suministro de vapor, pero el hacer un cierre a la válvula de vapor sin cortar el suministro de donde provenga el vapor también puede ser peligroso, por lo que el paro de emergencia solo cortará la suministración eléctrica, sin colocar ningún bloqueo a la entrada o salida de vapor, logrando así que el vapor fluya aun con la generación desconectada con esto se aseguraría la descarga continua del vapor.

Es importante tener un mando único en paros de emergencia, por lo que se debe añadir nuevos sistemas de seguridad a cualquier adaptación, mejora y/o modificación que tenga el proyecto sin que se anule ninguno de los existentes.

Todo el sistema de instrumentación estará contenido en un gabinete de acero inoxidable que dará orden y soporte a la instrumentación. Aquí se colocarán los botones e indicadores para la interacción con el usuario.



CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA TURBINA DE VAPOR

Una vez que los parámetros más generales han sido definidos se comienza con el diseño físico de la turbina, es importante mencionar que esta etapa del proyecto es definida en gran medida por la existencia de las partes en la vida cotidiana, en todas las características se considera imprescindible que cumplan con los requerimientos mínimos de la planeación, aunque en la gran mayoría los excede. En parte eléctrica todos los aparatos seleccionados cumplen con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), "NMX" o "UL-NOM" y "NYCE" o su semejante en sus países de fabricación: Conformidad Europea, (CE) por sus siglas en francés.

La parte más delicada de la turbina son los álabes, debido a que estos son de difícil construcción y la gran mayoría solo se construye para turbinas industriales de más de un metro de longitud, como se ha visto en la planeación la longitud de los álabes va muy relacionada con el espesor y ancho de los mismos, en este proyecto se usará un rotor Americano diseñado por FORD inicialmente como convertidor de par, ya que su fabricación es de línea y la corona viene incluida en el borde de los álabes haciendo este rotor de una sola pieza, es forjado en aluminio lo cual contribuirá al poco deterioro de los álabes por la sobre exposición al vapor.

Este rotor es la base de la turbina y determina el tamaño y propiedades de los demás componentes, aunque este rotor es casi ideal para el funcionamiento de la turbina al ser de aluminio no cuenta con peso suficiente para crear una inercia en el movimiento rotacional, por lo que se modificará. Una vez establecidas las características del rotor los demás componentes se diseñaran para ser ajustados comenzando desde el rotor, hasta el alternador, para después establecer los parámetros de la instrumentación. Estos se separaran en componentes mecánicos, eléctricos y de instrumentación.

La parte de tornillería se hace con apriete Allen o hexagonal, evitando lo más posible el desgaste de las cabezas de los tornillos y su fácil sujeción. El diseño de los principales componentes de la turbina se muestra en planos realizados específicamente para este proyecto, las vistas más importantes para el seguimiento del proyecto se mostrarán en este capítulo, los planos más detallados se encuentran en el anexo.

Todos los elementos son detallados de manera individual, sometidos a pruebas en conjunto y modificados de ser necesario para ser sometidos al mismo proceso hasta que quede satisfecha cualquier prueba de calidad y seguridad.

3.1. Elementos mecánicos

Los elementos mecánicos de la turbina están diseñados de forma particular para el proyecto, con la finalidad de que la energía cinética del fluido entrante sea eficientemente convertida en trabajo en el eje. Son proyectados con materiales capaces de soportar las severas condiciones del vapor y atenuar las vibraciones propias del movimiento de rotación del eje.

3.1.1. Rotor

El primer diseño es de los álabes del rotor. El ancho de los álabes de una turbina de reacción es ideal para la experimentación ya que este tiene una eficiencia mayor cuando las RPM son variables. En la Figura 3.1 se muestra la vista en planta del rotor y sus álabes con dos cortes transversales, uno de ellos el más alejado a su centro (corte AA') el más cercano a su centro (corte BB'), comparando ambos cortes se puede observar como los álabes cambian de tamaño y se hacen más grandes conforme se alejan de su centro para obtener mayor captación de vapor

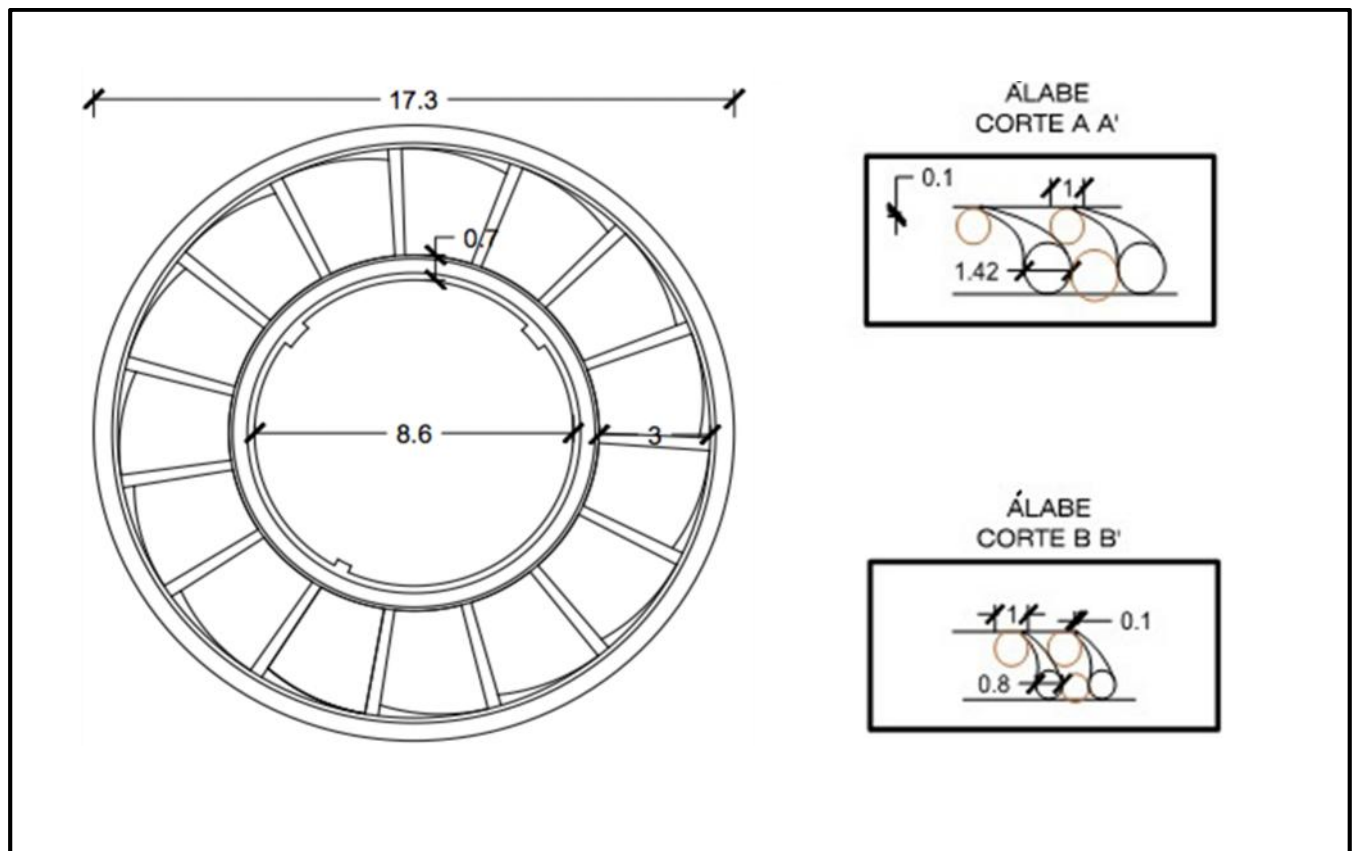


Figura 3.1 Vistas de los álabes del rotor

El corte BB' caracteriza el nacimiento del álabe y el corte AA' muestra el álabe al término de su longitud. En la Figura 3.2 muestra la perspectiva de los álabes. El espacio interior será cubierto por una maza de acero inoxidable con un peso de 1.7 kg para que la inercia sea mayor, juntos constituyen el rotor.

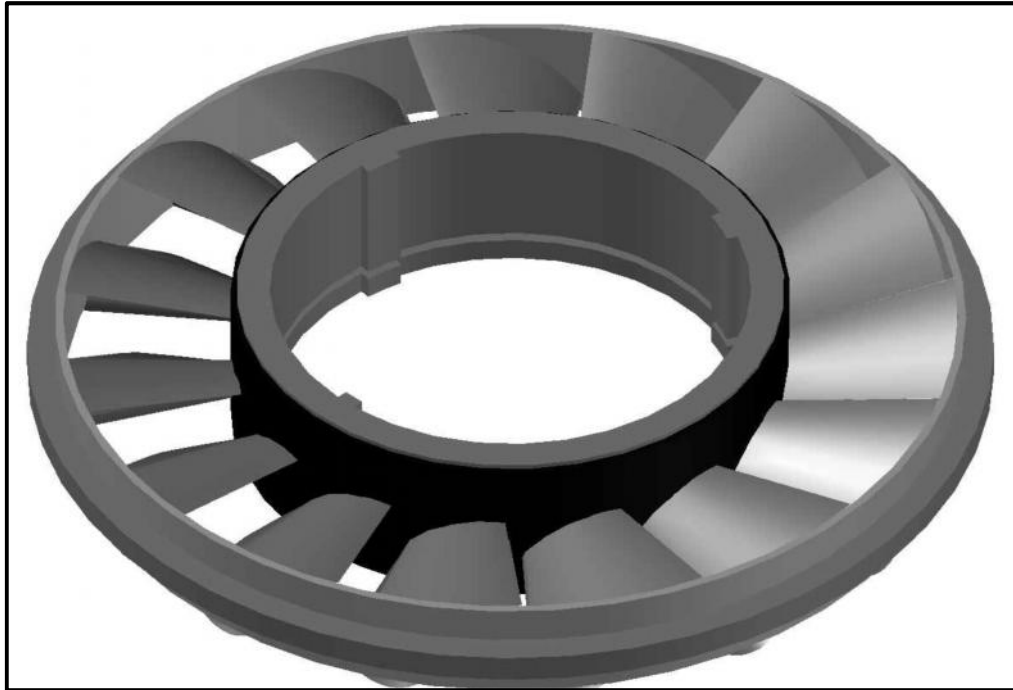


Figura 3.2 Perspectiva del rotor con corona

La masa es acoplada y balanceada, para evitar que por error se coloque de manera incorrecta, se colocan tres guías con diferente espesor y a distancias no simétricas para hacer única la colocación de la masa, facilitando así su armado y evitar problemas de balanceo. En el centro del rotor se encuentra un acoplamiento para el eje de la turbina, se fabrica con un perno de seguridad para evitar el deslizamiento entre el eje y la masa de inercia, el perno es apretado con un tornillo de seguridad (prisionero) insertado desde el lado frontal de la masa (Figura 3.3).

El rotor lleva una protección de acero inoxidable en forma de disco para dar mayor fijación de los álabes con la masa y mejorar la presentación. Esta cuenta con un orificio en el centro para sujetar el eje con el rotor (Figura 3.4). El giro de los álabes será en dirección opuesta a las manecillas del reloj, el vapor golpeará uno de sus álabes en su parte más gruesa impulsándolo y permitiendo que el vapor choque con el segundo álabe y así sucesivamente hasta realizar un giro completo. Las mediciones de las R.P.M. se realizarán en la parte media de la turbina lejos del vapor sin que esto afecte la veracidad de la medición.

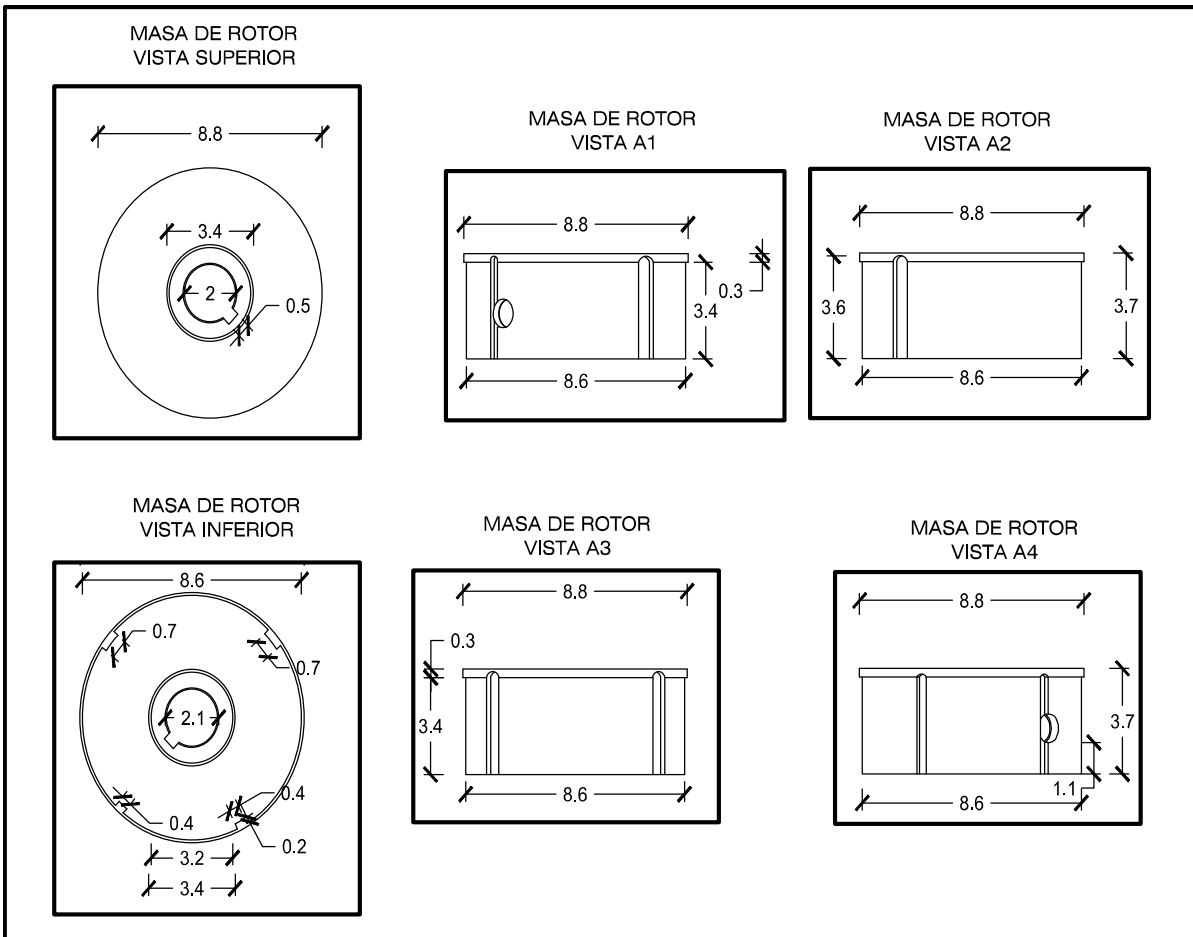


Figura 3.3 Vistas de la masa del rotor

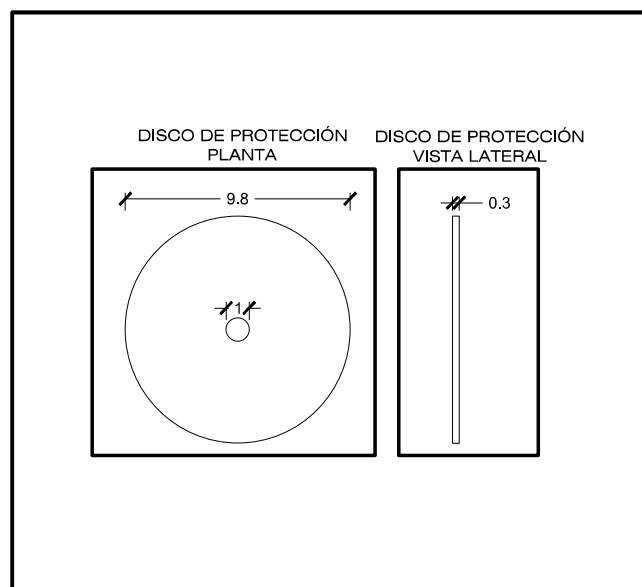


Figura 3.4 Vistas del disco de protección

3.1.2. Estator

El estator tiene dos grandes funciones, es encargado de proteger y aislar los álabes, tanto como para protección del aparato como del usuario, y es usado para canalizar el vapor durante todo su paso por los álabes.

Al ser la barrera física entre la turbina y el ambiente una de las características principales del rotor para este diseño es que debe ser visible en su mayoría y que esta: “falta de estator” limite lo menos posible el funcionamiento de la turbina, por lo que se decide realizar el corte para mantenimiento de manera vertical y no horizontal como la mayoría de las turbinas. Este corte se divide en dos partes unidas por un empaque de alta temperatura para el vapor y es una peculiaridad remarcable del proyecto, ya que gracias a las características únicas del estator es posible hacer observaciones en tiempo real con otros fluidos sin los peligros que conlleva el uso del vapor.

La Figura 3.5 muestra en su parte superior la colocación de la boquilla para la entrada de vapor y en la parte posterior las salidas del vapor, después de ser usada la turbina debe ventilarse para evitar la corrosión de los componentes internos. Para ello se coloca una salida de mantenimiento en su parte central, que será auxiliar en la conservación de un ambiente seco en el interior de la turbina mientras no esté en uso, sin que sea necesario un desmonte completo del rotor.

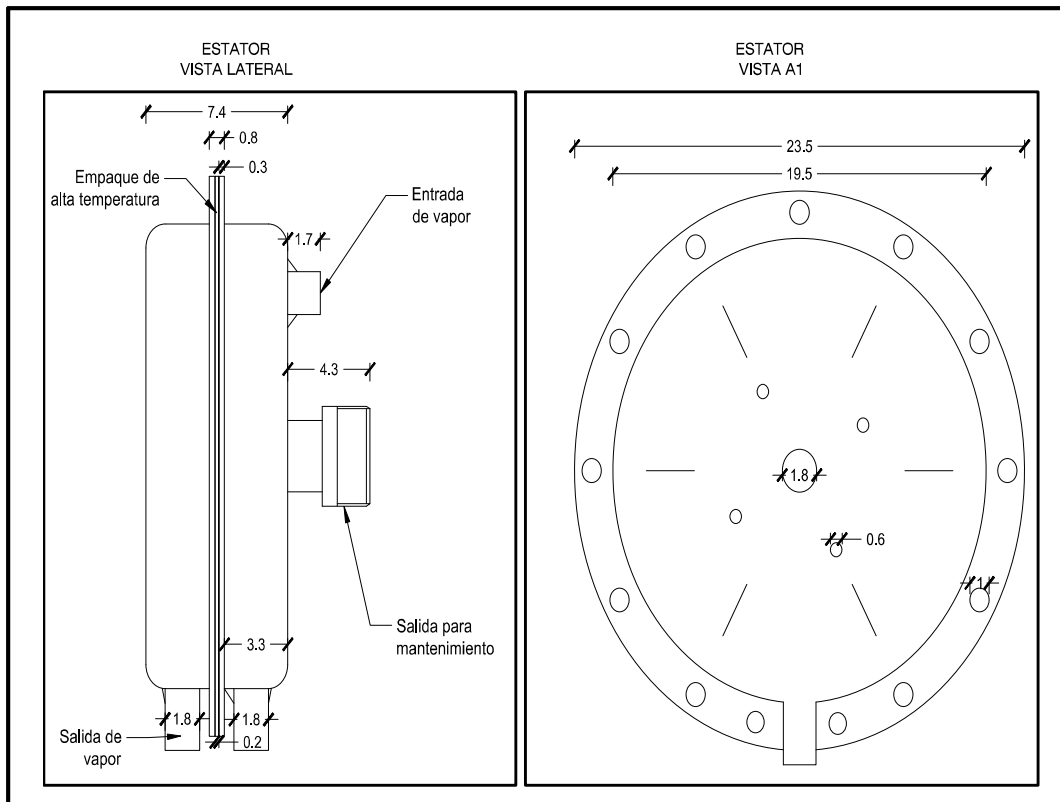


Figura 3.5 Vistas del rotor

3.1.3. Eje de la turbina

El eje es pieza fundamental de la turbina, ya que además de transmitir la energía mecánica es el encargado de soportar el peso de los elementos colocados en el mismo. El propio eje en su parte inicial es usado como acoplamiento al rotor, ya que coloca un espacio para el perno de seguridad y se hace una cuerda en el interior del eje para el tornillo de acero inoxidable (AI que por sus siglas en inglés es SS, stainless steel) que sujetará el eje con el rotor. El empotramiento del eje con el cuerpo de la turbina o armadura se hace a través de baleros por lo que el eje de la turbina es fabricado con diámetros variables y en acero inoxidable, para evitar la corrosión.

En la Figura 3.6 se observa que no es un eje común, será utilizado de acoplamiento, es necesaria una fabricación dedicada, se diseña para fijarse al rotor mediante un tornillo de acero inoxidable y tiene tres orificios para pernos de seguridad a lo largo de su morfología. El primero es del lado de la turbina para asegurar que el movimiento del eje del rotor sea el mismo que del eje llevando prácticamente a cero la desalineación torsional. La cuerda en su diámetro interior asegura el eje al rotor y evita la desalineación axial. Modificará su diámetro para acoplarse a los de los valeros y tendrá cuerda en su diámetro exterior para apretar con tuerca al cuerpo la turbina y dar una fijación fuerte pero alterable en caso de necesitarse, en esta parte se coloca el segundo perno de seguridad, para asegurar la homogénea rotación entre el eje y el balero.

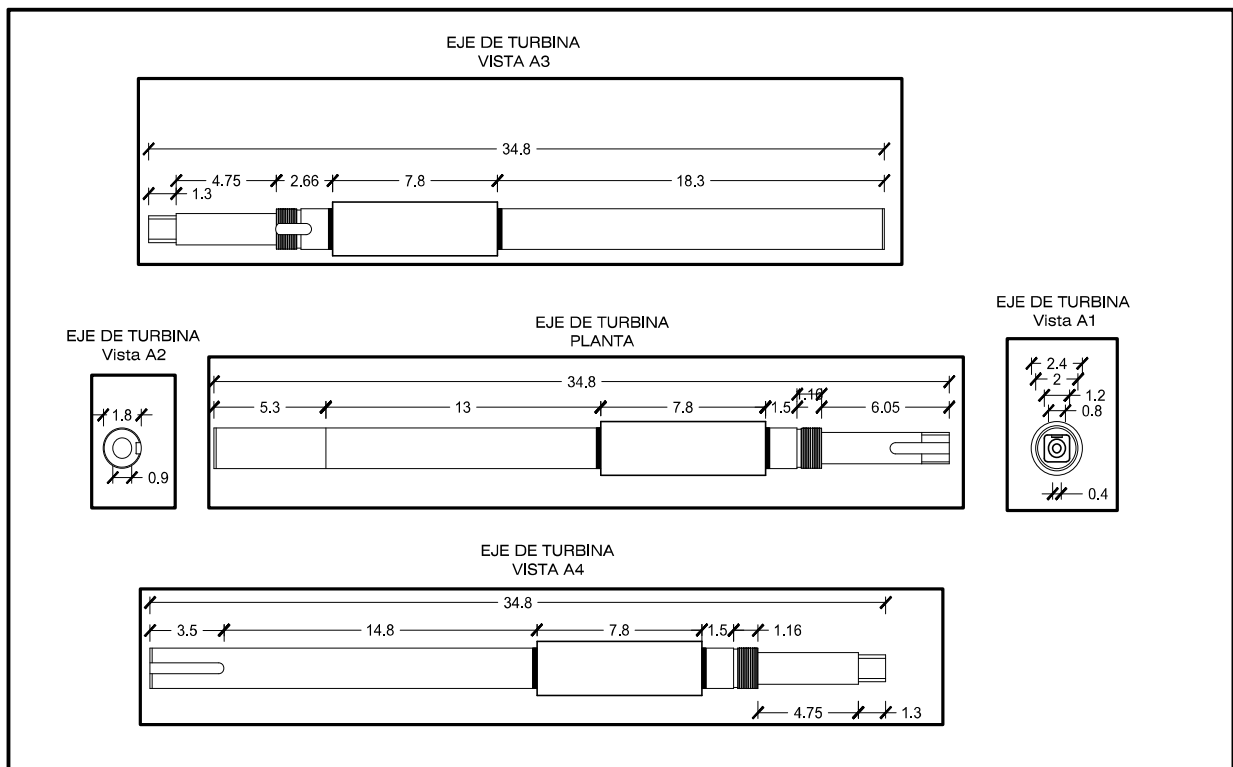


Figura 3.6 Vistas del eje de la turbina

En su parte final su forma tubular reduce su diámetro y se remata en forma cuadrada, buscando de esta manera el uso de herramientas de sujeción cuadrada o hexagonal ya que la herramienta de sujeción tubular es menos eficaz y tiende a dejar marcas sobre el objeto que sostiene. Con ello se protege lo más posible el eje cuando sea necesario hacer sujeciones fuertes, haciendo altamente viable un constante mantenimiento y/o modificación para ensayo y error, de igual manera es colocado un perno de seguridad. Es importante retirar los pernos de seguridad antes de desmontar el eje de la turbina, ya que estos impedirán el movimiento rotacional entre los elementos de la turbina, mismo que será necesario para su desarme.

3.1.4. Cuerpo de la turbina

El cuerpo de la turbina es el encargado de retener los baleros que sujetan al eje de la turbina y asegurarlo a la base, se muestra en la Figura 3.7. Sirve como bloque principal de la turbina y es el vínculo de los rodamientos con las partes fijas.

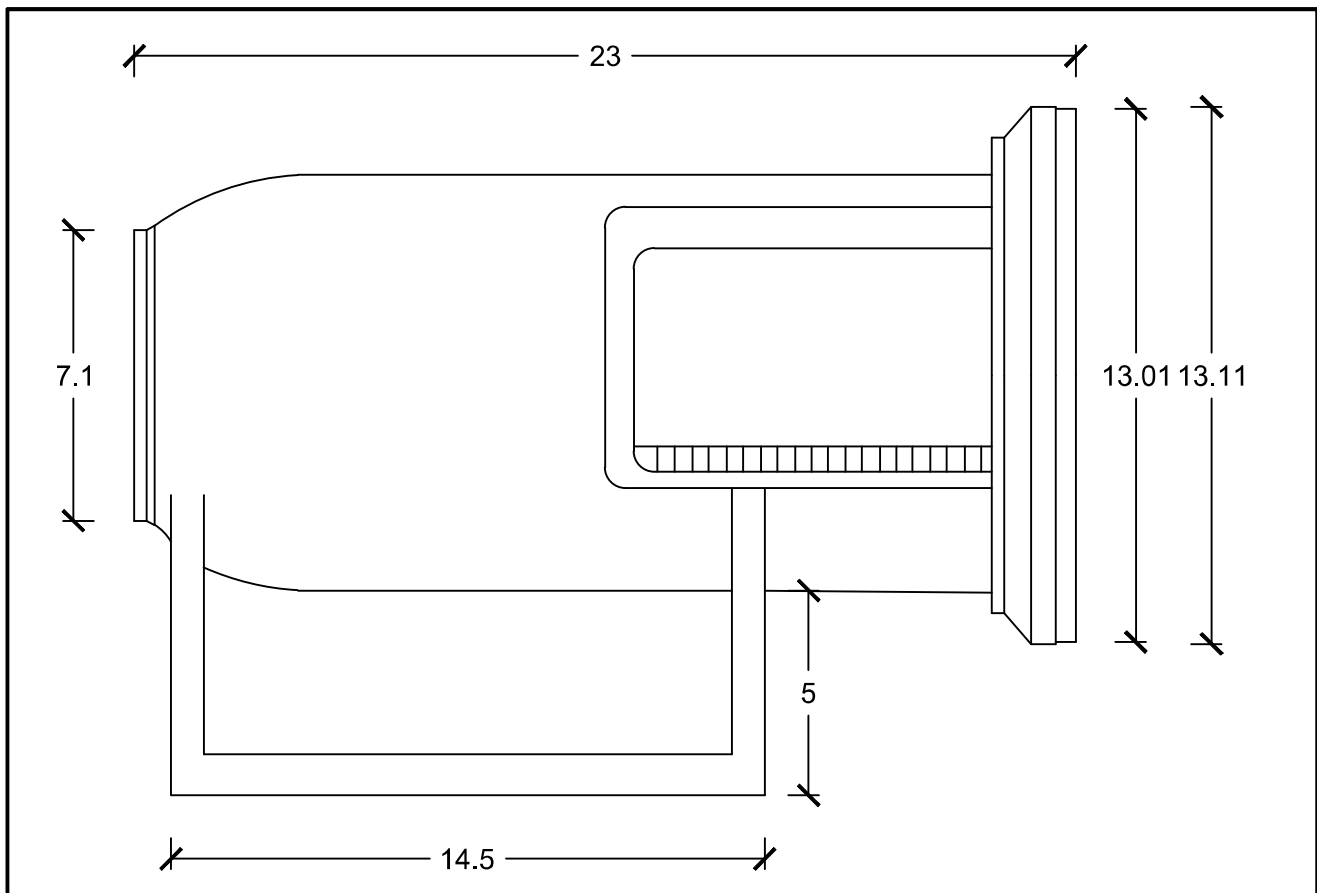


Figura 3.7 Vista frontal anterior del cuerpo de la turbina

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA TURBINA DE VAPOR

Cuenta con varios orificios para el paso de tornillos y el espacio para empotrar los baleros. En la Figura 3.8 en su vista lateral se observan los orificios en donde quedarán empotrados los baleros y sus diferentes diámetros; en su vista en planta se pueden observar los orificios de fijación a la base de la turbina de 1 cm cada uno.

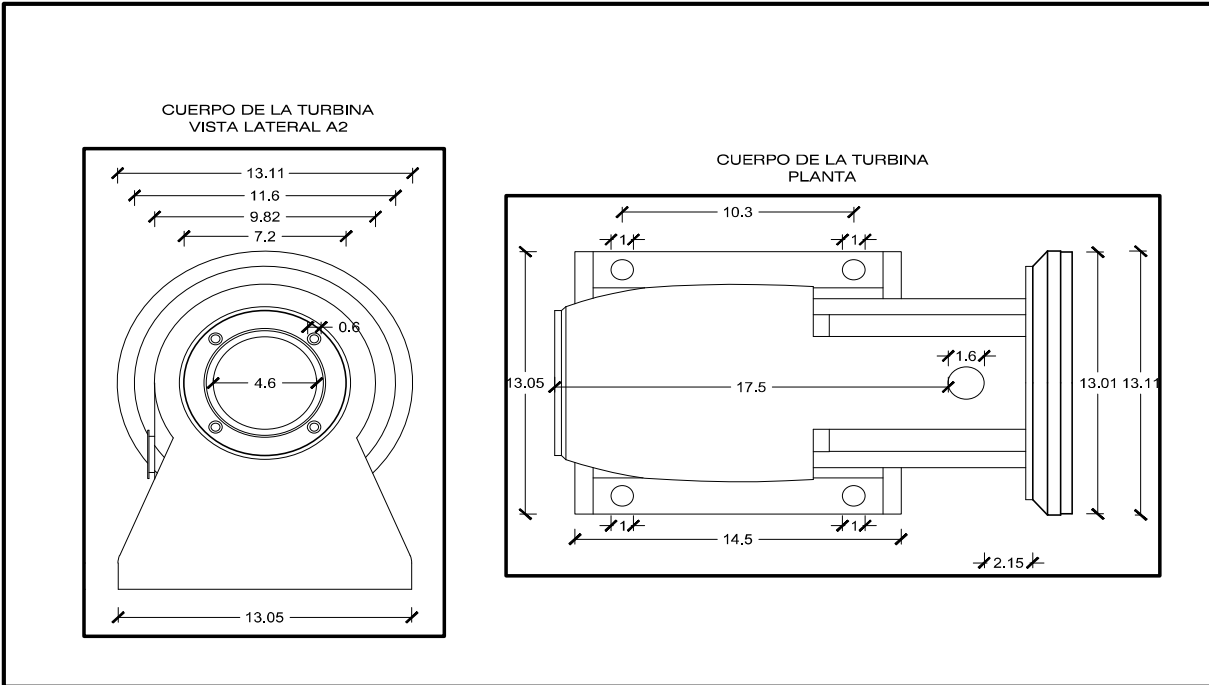


Figura 3.8 Vista lateral y planta del cuerpo de la turbina

El cuerpo de la turbina es casi simétrico para equilibrar el peso, pero en su parte lateral izquierda cuenta con orificios de desfogue en caso de que en alguna prueba el vapor llegue al cuerpo de la turbina (Figura 3.9).

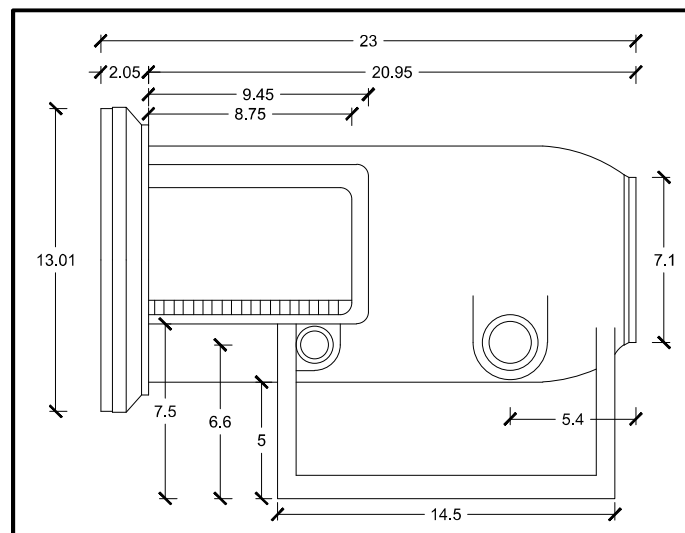


Figura 3.9 Vista frontal posterior del cuerpo de la turbina

3.1.5. Acoplamiento a alternador

El eje en su parte final va acoplado al alternador, para esto se usa un acoplamiento de quijada, el cual permite un margen aceptable en caso de existir desalineaciones, lo que ayuda a prescindir de una alineación más costosa. El acoplamiento de quijada del lado de la turbina se sostiene mediante un perno de seguridad aprisionado por un tornillo de acero inoxidable. Por la parte del alternador se usa un perno fabricado específicamente para acoplarse al eje del alternador. La Figura 3.10 muestra un desmembramiento del acoplamiento de quijada mientras que la Figura 3.11 los accesorios usados para su correcto funcionamiento.

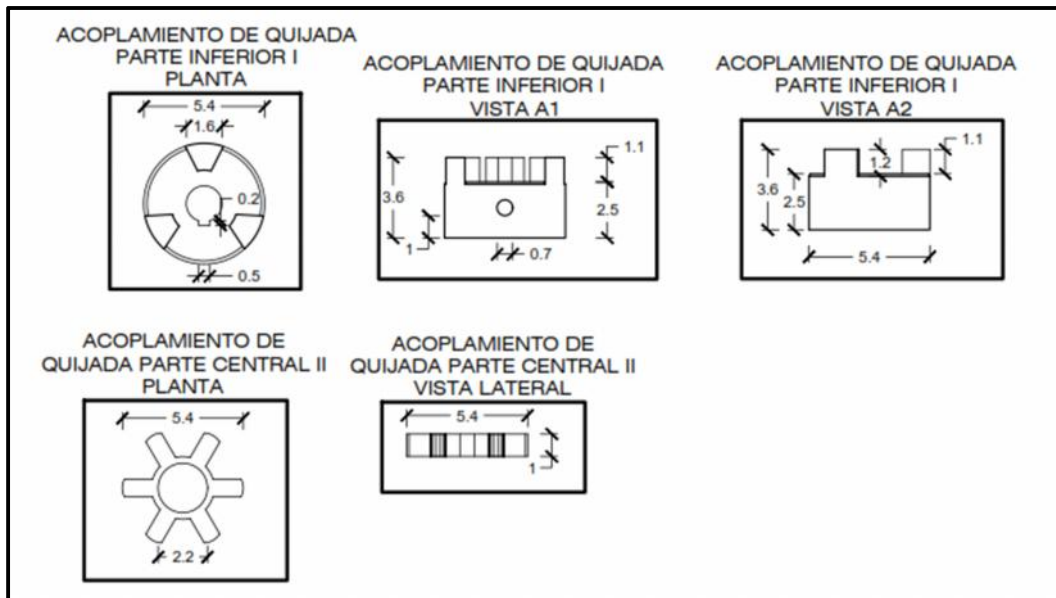


Figura 3.10 Vista lateral y planta del acoplamiento de quijada

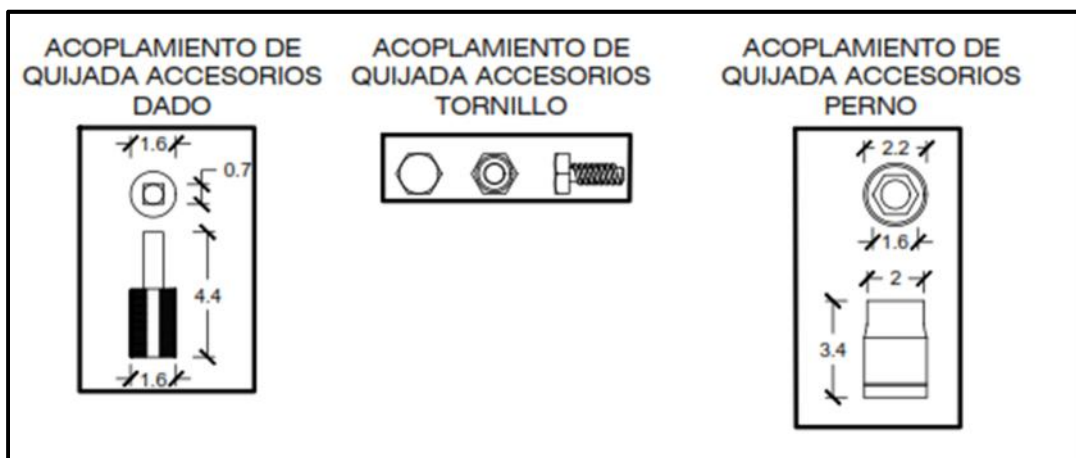


Figura 3.11 Accesorios del acoplamiento de quijada

3.1.6. Base de la turbina

El cuerpo de la turbina y el alternador tienen que estar perfectamente fijos por eficiencia del equipo y por seguridad del usuario, se fabrica una base en acero inoxidable capaz de soportar el peso de la turbina, el alternador y la parte de instrumentación que sea necesaria (Figura 3.12), cuenta con unas hojillas ya que se recomienda la fijación a una mesa de trabajo, con el fin de evitar lo más posible las vibraciones por movimiento. La base cuenta con un soporte para dar altura al alternador y es diseñada con un grueso suficiente (5mm) para dar cuerda a los orificios de montaje con un machuelo evitando en los soportes de menor esfuerzo el uso de tuercas.

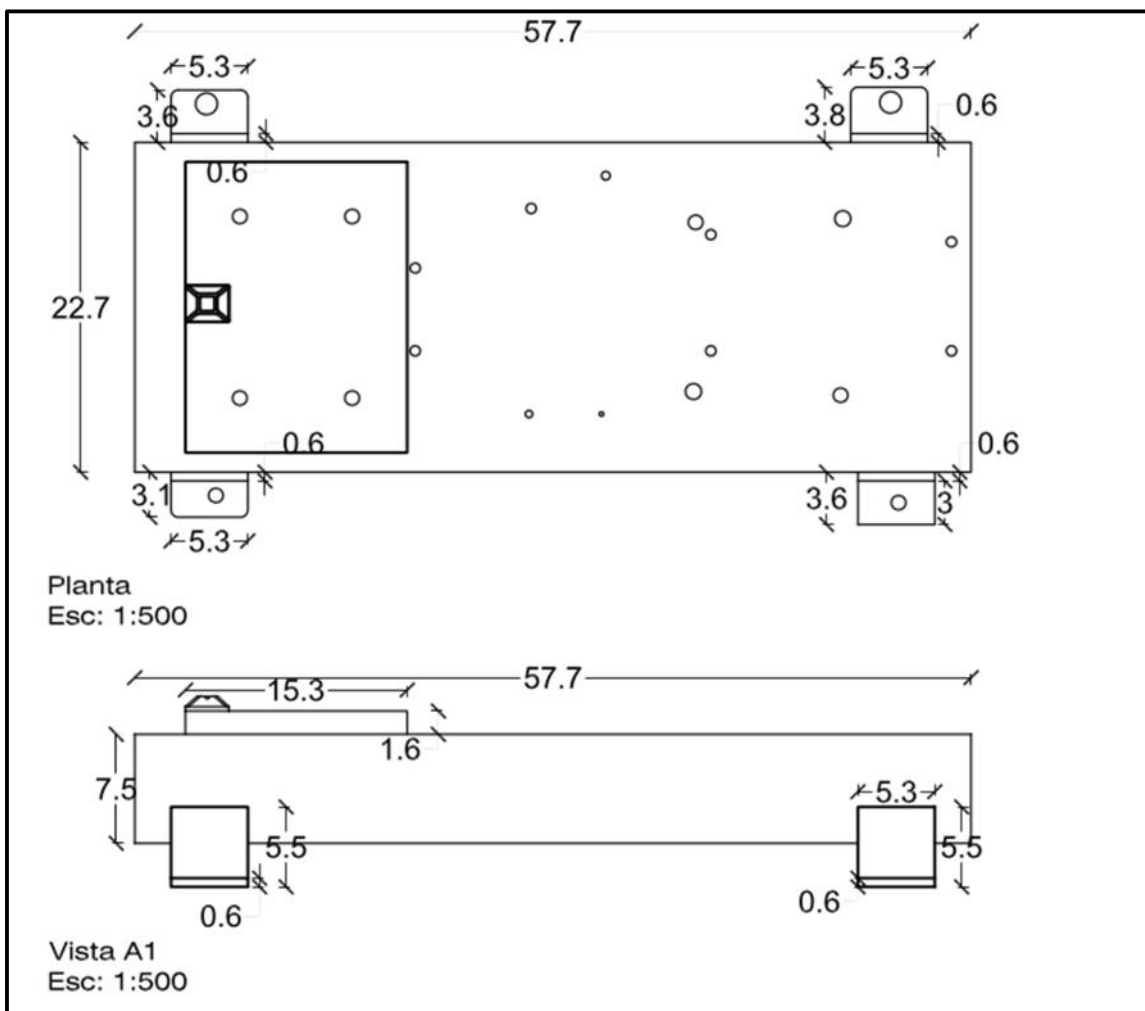


Figura 3.12 Vista planta y lateral de la base de la turbina

3.1.7. Elementos estructurales y auxiliares

El correcto armado de la turbina requiere diferentes elementos que den seguridad y fijación a las piezas principales:

a) Baleros o material rodante

Existe una enorme variedad de rodamientos, para la aplicación de la turbina es necesario soporte principalmente una carga radial causada por el peso del eje, teóricamente el empuje axial debe ser nulo, en la práctica esto resulta imposible por lo que es necesario un rodamiento que soporte cargas axiales y tenga un bajo consumo de potencia para hacer más eficiente el movimiento.

Los rodamientos de bolas de ranura profunda tienen un uso muy extendido y se utiliza en una gran variedad de aplicaciones. Son capaces de soportar cargas radiales, y pueden absorber cargas axiales moderadas en ambos sentidos. Debido a su bajo par de rotación, son ideales para aplicaciones que exijan una alta velocidad y bajo consumo de potencia, son de ensamblaje sencillo y disponen de una amplia gama de especificaciones posibles (NSK, 2017).

Los diseños de los rodamientos vienen de fábrica y se utilizarán los acordes para el eje de la turbina (1.8 cm), la Figura 3.13 muestra el rodamiento usado en la turbina.



Figura 3.13 Rodamiento de bolas de ranura profunda (NSK, 2017)

b) Tornillos de acero inoxidable (AI) y arandelas

Para la correcta sujeción de piezas son necesarios diversos tipos de tornillos y arandelas, debido a la cercanía con el vapor se usa en su mayoría tornillos de acero inoxidable y arandelas de presión debido a la vibración que se generara en la rotación del eje.

3.2. Generación de electricidad

El pilar de la generación de electricidad es el alternador, este es el encargado de la inducción y la generación de corriente por medio del movimiento rotacional de su eje, el almacenamiento de esta energía será en la batería de CD y convertida por medio del inversor a salida de 120VCA y un puerto USB de 5CD.

El alternador, batería e inversor son obtenidos de fábrica y de sus respectivas marcas, sus diseños son usados para el funcionamiento de la turbina. Por otra parte la conexión, control, instrumentación, acoplamiento así como su cableado de interconexión a la turbina son diseños originales de este proyecto.

3.2.1. Alternador

Las dimensiones necesarias para hacer la fijación a la base de la turbina y su acoplamiento al eje se toman del diseño de fábrica del alternador que se plasma en la Figura 3.14,

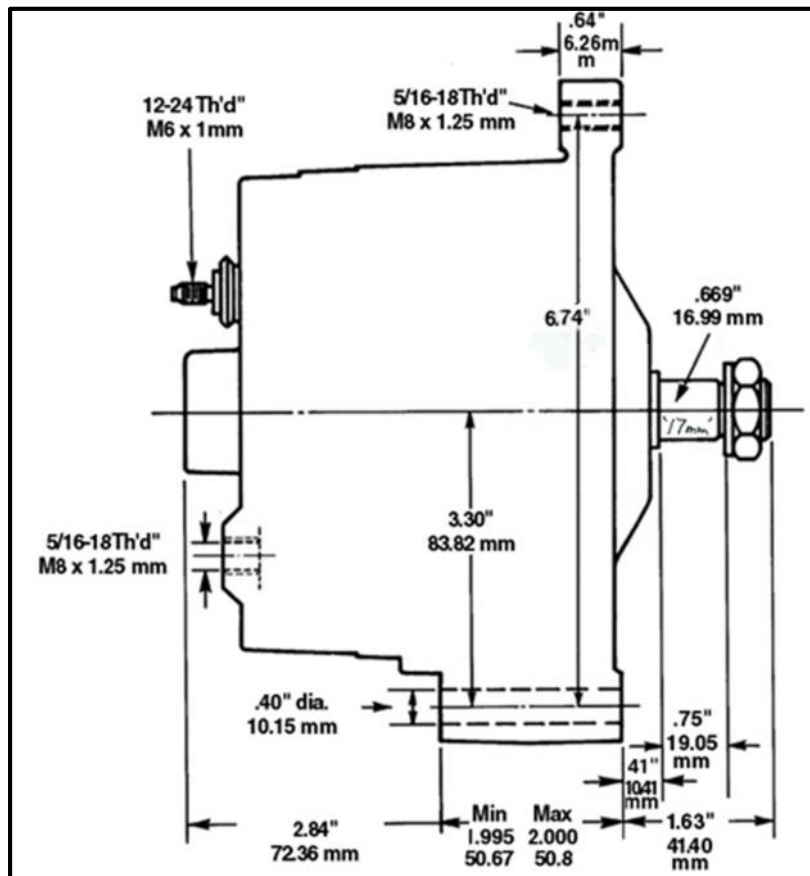


Figura 3.14 Diagrama y dimensiones del alternador

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA TURBINA DE VAPOR

El alternador es basado en un alternador para autos marca “New GM Delco”, este es modificado en su embobinado y en los imanes permanentes para alcanzar 12V a 130 RPM, en la Figura 3.15 se muestra una gráfica que relaciona las RPM con el voltaje y los amperajes alcanzados.

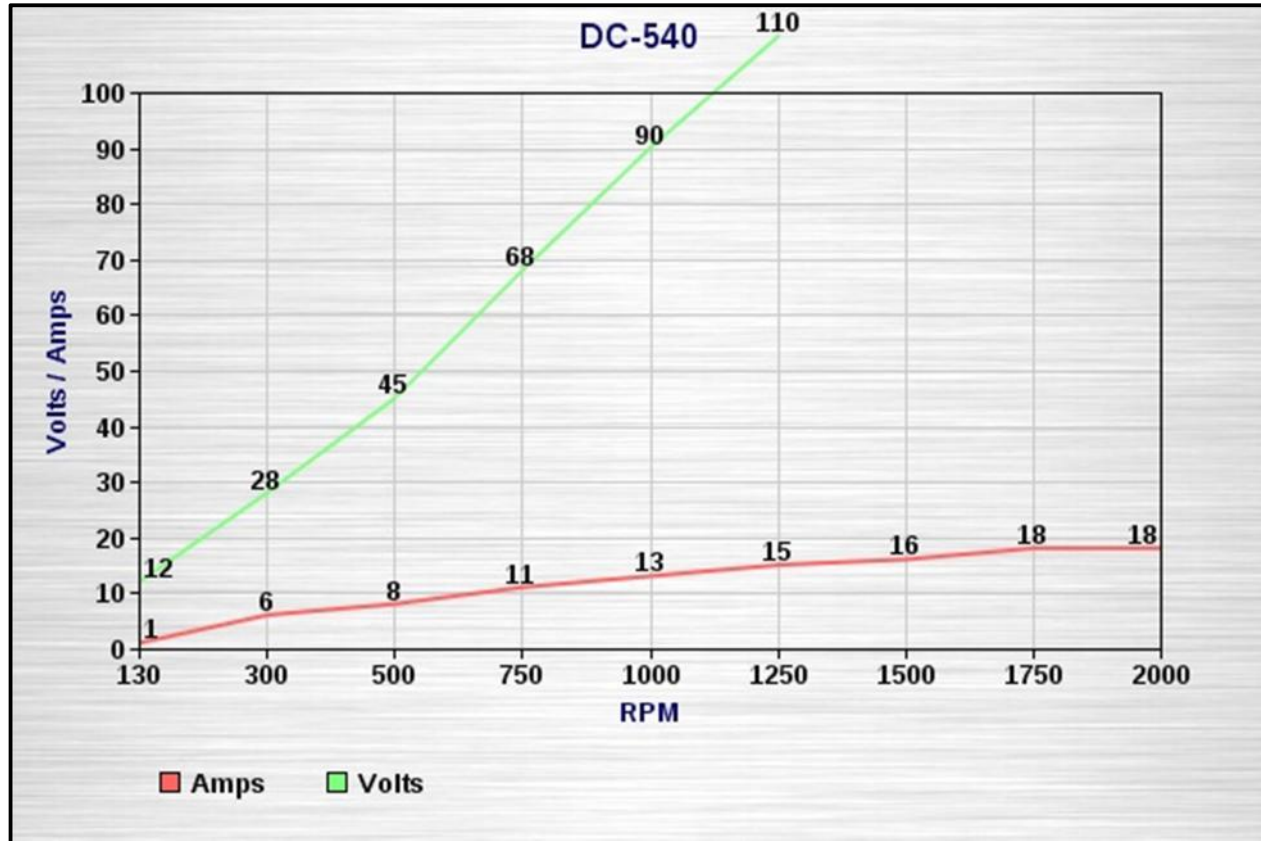


Figura 3.15 Respuesta de alternador RPM vs Volt/Amp (DELCO, 2011)

Durante el uso de la turbina el giro generara pérdidas en forma de calor que elevarán la temperatura, variable principal de la resistencia por lo que las pruebas se hacen con diferentes resistencias, los voltajes y corrientes inducidas se obtienen de manera empírica. El alternador es caracterizado según la Tabla 3.1 de ésta se obtiene el voltaje y amperaje obtenido usando una fuerza τ [N-m] para el giro, del voltaje y el amperaje se calcula la potencia real obtenida y su eficiencia.

Del análisis de la Tabla 3.1 se hace notar que al disminuir la resistencia, hay una tendencia a aumentar la eficiencia del alternador, esto es congruente ya que al trabajar en vacío la resistencia mecánica al giro será menor con ello el calor generado será menor. Al aumentar las RPM también existe una tendencia en el aumento de eficiencia, esto se debe a que el diseño del alternador no está hecho para RPM tan bajas, es perceptible el aumento de RPM a un aumento de potencia en la salida.

Tabla 3.1 Características de alternador a diferentes RPM (DELCO, 2011)

# Prueba	Mediciones					Cálculos	
	Š [rpm] ¹	R [h]	Voltaje [V]	Amp. [A]	† _{entrada} [N-m] ¹	P _{salida} [W]	γ ¹ [-] ¹
1	49	28.0	2.79	0.08	0.35	0.223	0.1247
2	49	24.5	2.74	0.12	0.39	0.329	0.1637
3	49	21.0	2.67	0.12	0.36	0.320	0.1723
4	49	17.5	2.57	0.16	0.40	0.411	0.2009
5	49	14.0	2.44	0.16	0.43	0.391	0.1754
6	49	10.5	2.26	0.20	0.43	0.452	0.2030
7	49	7.0	1.98	0.28	0.53	0.553	0.2022
8	49	3.5	1.44	0.40	0.65	0.577	0.1720
9	49	2.0	1.23	0.44	0.69	0.541	0.1531
10	49	1.0	0.65	0.60	0.84	0.388	0.0902
11	117	28.0	8.15	0.28	0.59	2.282	0.3144
12	117	24.5	8.00	0.32	0.62	2.560	0.3394
13	117	21.0	7.80	0.36	0.67	2.808	0.3413
14	117	17.5	7.54	0.40	0.71	3.016	0.3469
15	117	16.0	7.46	0.44	0.73	3.282	0.3662
16	117	15.0	7.30	0.48	0.77	3.504	0.3694
17	117	14.0	7.18	0.52	0.75	3.734	0.4058
18	117	12.5	7.06	0.52	0.82	3.671	0.3654
19	117	11.5	6.86	0.56	0.86	3.842	0.3628
20	117	10.5	6.67	0.60	0.88	4.002	0.3700
21	117	9.0	6.49	0.68	0.92	4.413	0.3925
22	117	8.0	6.14	0.76	0.99	4.666	0.3864
23	117	7.0	5.87	0.80	1.08	4.696	0.3541
24	209	28.0	15.46	0.52	0.87	8.039	0.4246
25	209	24.5	15.16	0.60	0.93	9.096	0.4450
26	209	21.0	14.78	0.68	1.02	10.050	0.4500
27	209	17.5	14.31	0.80	1.10	11.448	0.4751
28	209	16.0	14.06	0.84	1.14	11.810	0.4721
29	209	15.0	13.82	0.88	1.20	12.162	0.4636
30	209	14.0	13.63	0.96	1.23	13.085	0.4849
31	209	12.5	13.27	1.04	1.29	13.801	0.4887
32	209	11.5	12.95	1.08	1.35	13.986	0.4741
33	209	10.5	12.64	1.16	1.42	14.662	0.4720



3.2.2. Batería e inversor de voltaje

El almacenamiento de energía y su conversión a 127VCA se lleva a cabo a través de un sistema común de batería-inversor, es decir, se conectará una batería de 12VCD a un inversor de voltaje que convertirá la CD en CA como se lleva a cabo en un sistema de vehículos genérico.

Este sistema se acopla al sistema de control que se diseña para la turbina, su entrada y salida del sistema completo de la turbina será manejado a través del diseño de instrumentación por lo que el diagrama donde especifica su operación, su tipo de encendido y apagado son descritos en la parte de control.

3.2.1. Conversión CA a CD

La conversión de corriente alterna a corriente directa no es un proceso propio de las turbinas de vapor a nivel industrial, la frecuencia de la CA es controlada principalmente por la velocidad de giro de la turbina y es enviada a la subestación para su posterior transmisión. Este tipo de regulación implica un elevado costo, un constante suministro de vapor y limitaciones importantes en el área experimental por lo que se adapta un conversor genérico de corriente alterna a corriente directa, al ser un auxiliar en el uso de la energía no se profundiza en el tema, se utiliza un diseño de fábrica pero se separa cada conexión con clemas en dado caso que sea necesario tomar mediciones eléctricas paso a paso.

3.3. Diseño de elementos de control e instrumentación

La instrumentación de la turbina será parte esencial en su uso y experimentación, se usan las variables necesarias para determinar las características más importantes de la turbina, como la velocidad y potencia para poder relacionarse con las características del vapor usado y obtener la eficiencia si así es requerido por otros proyectos. Al ser una turbina para experimentación se decide contar con una medición de voltaje y amperaje por separado.

a) Voltímetro

La medición del voltaje es esencial para el buen funcionamiento de la turbina, ya que un sobre voltaje puede ocasionar pérdidas irreparables en el sistema eléctrico, proporciona una evaluación adecuada del funcionamiento del regulador de voltaje y a su vez del alternador y la batería. Se usa un voltímetro americano de Astron Corporation modelo M1

b) Amperímetro

El flujo de corriente está muy relacionado con el número de RPM del alternador, es una de las variables más dinámicas de la turbina, por lo que es necesario tener una evaluación certera en todo momento de la corriente que genera la turbina. Se usa un Amperímetro americano fabricado por Astron Corporation modelo M1.

c) Tacómetro

La variable mecánica más relacionada con el sistema eléctrico es el número de vueltas a las que gira la turbina por ello es imprescindible la medición de las RPM, se lleva a cabo por medio de un tacómetro Lutron Electronic modelo DT-2240D con un rango de 5 a 10,000 RPM con una resolución de 0.1 RPM y una exactitud de $\pm 0.05\%$, este cuenta con un sensor de proximidad modelo PX-01 que se fija al centro de la base (Figura 3.16) y realiza la medición a cada vuelta del acoplamiento de quijada.

3.4. Esquema completo de la turbina de vapor

Realizados todos los esquemas se puede obtener el esquema prototipo para el armado de la turbina, es el pilar principal para su construcción, debido a problemas físicos durante su ensamble y/o cambio de costos por cambio de USD o el acero inoxidable pueden existir ligeras variaciones.

Las Figuras 3.16 y 3.17 muestran la turbina en su versión final, por su lado izquierdo se encuentra el cuerpo de la turbina, en su parte media el acoplamiento de quijada en donde es medida la velocidad de giro por un sensor de proximidad y por ultimo del lado derecho el alternador.

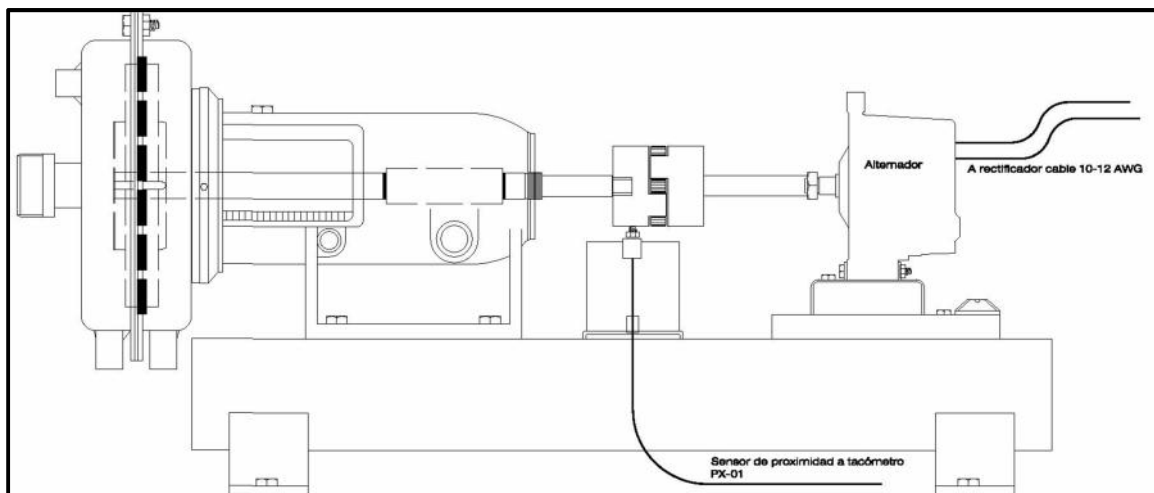


Figura 3.16 Turbina ensamblada vista lateral

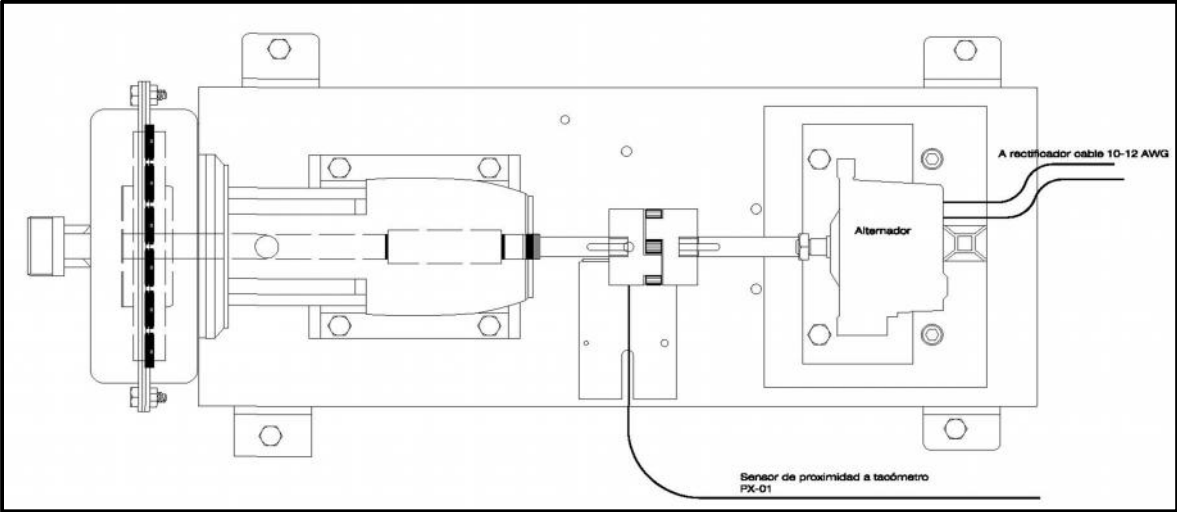


Figura 3.17 Turbina Ensamblada Vista en planta



CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DE LA TURBINA DE VAPOR

Durante el armado de la turbina se realizaron innumerables modificaciones, en este capítulo solo se plasman las decisiones finales en el diseño y la construcción de la turbina, por lo que existen ligeras modificaciones con respecto al capítulo de diseño, estas son detalladas si sus repercusiones son relevantes, de lo contrario solo son mencionadas.

Las piezas más particulares de la turbina son construidas específicamente para este proyecto y tienen una manufactura dedicada, el maquilado se omite debido a que no concierne al proyecto aunque la dificultad y costo de producción tiene alta repercusión en el diseño, en especial en el acoplamiento entre el eje y el alternador. Existen piezas que son tomadas de algún otro fabricante y acopladas para su uso, en ambos casos son referenciadas indistintamente del capítulo de diseño.

4.1. Ensamblado de cuerpo de la turbina con eje

El cuerpo de la turbina constituye la parte de soporte de los demás componentes por lo que se comienza por la fijación del eje de la turbina al cuerpo, para esto es necesario el uso de baleros, los mecanismos usados para este paso son mostrados en la Figura 4.1. La Figura 4.2 presenta el eje en la posición final,



Figura 4.1 Componentes para armado de base y eje de la turbina



Figura 4.2 Eje en posición final

Los baleros son rodamientos que deben ser colocados a presión tanto en la parte fija como en la móvil, para esto se necesita una maquina prensadora, la cual inserta los baleros a presión de manera uniforme. En la Figura 4.3 se observa la colocación del segundo balero en la parte posterior de la turbina y la figura 4.4 es una vista en planta de la turbina con el eje ya montado.



Figura 4.3 Colocación en prensa de balero secundario



Figura 4.4 Vista en planta del cuerpo de la turbina armado

El siguiente paso es fijar el cuerpo armado a la base de la turbina, para ello se usan tornillos de impacto con cabeza hexagonal, el montaje a la base con la parte posterior del estator se observa en la Figura 4.5.

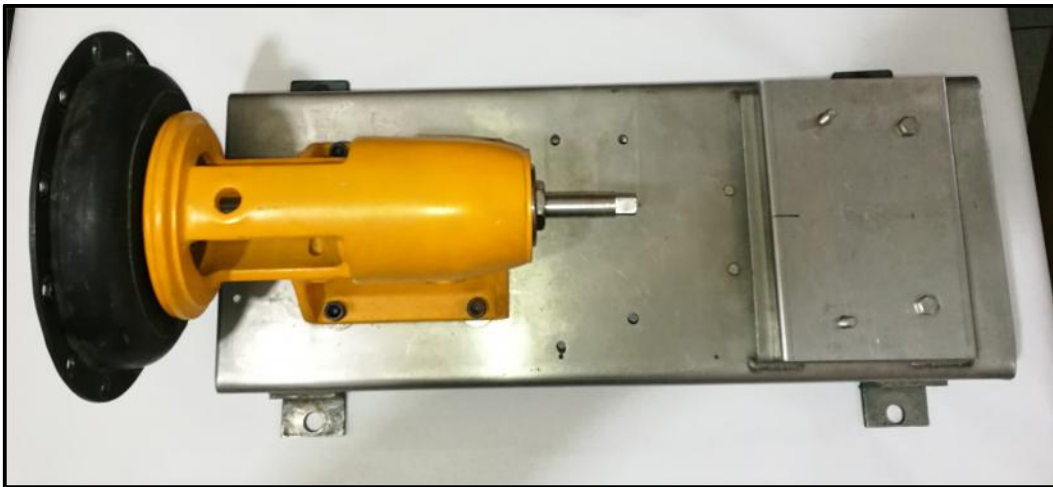


Figura 4.5 Fijación del cuerpo a la base de la turbina

Es importante mencionar que las únicas partes de la turbina que se colocan a presión son los baleros, si durante su ensamblaje es necesario algún tipo de presión o fuerza más grande que la que ejerce el propio peso de los componentes es muy probable sea debido a una incorrecta colocación de sus partes y se deberá rehacer la instalación.

4.2. Armado del rotor de la turbina

El rotor de la turbina es su parte más esencial y compleja, es susceptible a vibraciones, giros y desplazamientos no deseados que pueden dañar de manera permanente algún componente. Su correcto ensamblaje es fundamental para impedir cualquier tipo de percance en su funcionamiento, el diseño prevé los más importantes haciendo sencillo su montaje.

Es necesario como primer paso atornillar la parte posterior del estator al cuerpo de la turbina, esto se hace mediante 4 tornillos allen con cabeza plana, la masa del rotor se alinea y se desliza hasta que el perno de seguridad tenga el espacio suficiente para su posición, en la Figura 4.6 se observa la correcta alienación y la manera de apretar el tornillo prisionero insertado por la circunferencia de la masa.

Como se menciona en la parte de diseño las marcas en la masa no son simétricas por lo que invertir el sentido de entrada invertiría también el sentido del giro de los álabes. La masa cuenta con un borde en una de sus caras, este cambio da el sentido de giro y puede ser usado a conveniencia, para este proyecto el borde será colocado en la parte trasera, esto daría como resultado un sentido de giro contrario a las manecillas del reloj (izquierdo).



Figura 4.6 Instalación de la masa del rotor con giro izquierdo

4.2.1. Acoplamiento de álabes

Al ser la parte más complicada en su fabricación se decide no realizar ninguna fijación invasiva por lo que se diseña sin perforaciones, este tipo de fijación convierte los álabes en una pieza deslizable y requiere especial atención en su armado. En la Figura 4.7 se observan los álabes con la corona y las muescas en su parte central. Una de las características de una fijación deslizable es la poca fuerza que debe emplearse para colocarse y que el movimiento para su instalación será de manera paralela al eje, una vez instalado el giro de los álabes será el mismo que de la masa como si fueran una sola pieza.



Figura 4.7 Álabes del rotor

Una vez identificando las marcas de los álabes con las del rotor se procede a alinearlas y deslizar los alabes para fijarlos en la masa, con este simple acople se evita cualquier movimiento rotacional entre ellos, pero es necesario una tercera pieza para evitar el movimiento en el sentido del eje, por lo que se coloca la pieza de protección que se atornilla al eje. En la figura 4.8 se observa cómo al ensamblar ambas piezas se crea un espacio entre el borde de la masa y el borde interior de los álabes con esto se asegura que el disco de protección solamente aprisione los álabes, anulando cualquier tipo de movimiento en el sentido del eje. La Figura 4.9 muestra las tres piezas armadas conformando por completo el rotor de la turbina.



Figura 4.8 Álabes ensamblados a la masa del rotor



Figura 4.9 Rotor de la turbina armado con giro izquierdo

El rotor de la turbina está completamente armado y es posible cerrarlo para finalizar su montaje, pero se facilita la instalación de los demás segmentos si se tiene un rápido acceso al giro del eje por lo que. El sellado se conforma de 12 tornillos de acero inoxidable y un empaque de alta temperatura que se muestra en la Figura 4.10



Figura 4.10 Componentes para el sellado del rotor

4.3. Acoplamiento del alternador

El acoplamiento es una parte esencial de la turbina es una serie de dispositivos que tiene por objetivo transferir la energía mecánica entre los ejes de turbina y generador, dar sujeción al alternador y maximizar la eficiencia del giro, en su diseño nativo el alternador no está fabricado para ser colocado en la misma dirección que el eje encargado de moverlo por lo que es necesario como primer paso colocar sujetadores al alternador para poder asentarlos en la base, la Figura 4.11 presenta el alternador con los sujetadores instalados.

El eje del alternador será acoplado al eje de la turbina mediante un acoplamiento modificado de quijada, el acoplamiento se encuentra sujeto a ambos ejes por un tornillo de fijación apretado a un perno para impedir el movimiento rotacional entre el eje y el acoplamiento. Se usa un dado para la unión al alternador, este puede variar según el tipo de alternador que se utilice. La Figura 4.12 expande los aditamentos del acoplamiento de quijada.

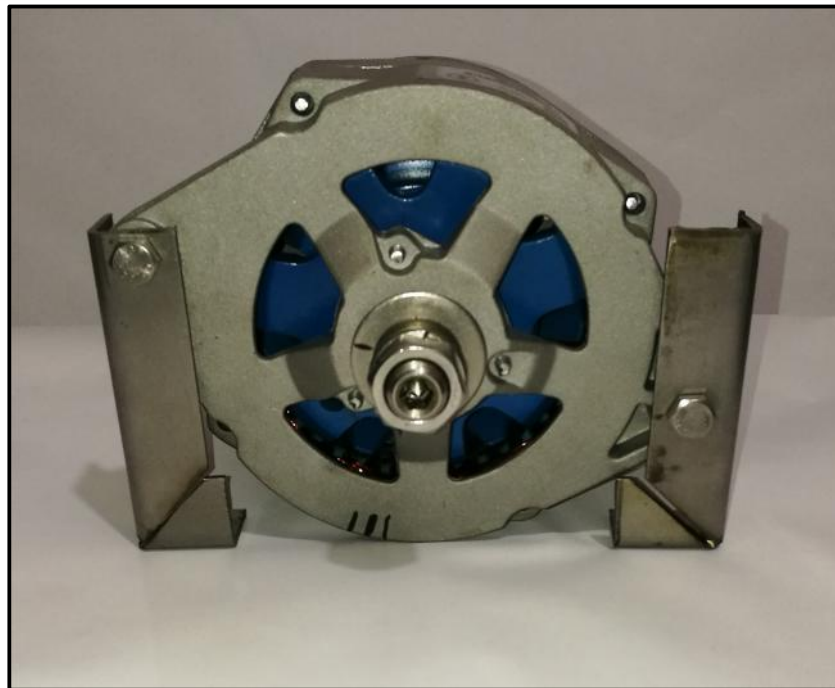


Figura 4.11 Alternador con sujetadores



Figura 4.12 Aditamentos para el acoplamiento de quijada modificado

El espacio entre la base de la turbina y el alternador debe ser en teoría solo el necesario de las piezas, en la práctica mientras el espacio sea más justo la instalación será más difícil por lo que se usa toda la movilidad que puedan otorgar las piezas. La primer "quijada" se desliza sobre la pieza del eje introduciendo el perno y después sujetándolo con el tornillo de fijación, el dado y el eje hexagonal se sobre ponen creando una sola pieza.

La Figura 4.13 presenta el acoplamiento instalado en el eje del alternador, en ella también se puede observar la desviación que se genera cuando las piezas no se encuentran completamente una dentro de otra, esta desviación se acorta conforme se compriman los componentes, pero será muy útil en el proceso de ensamblaje final.

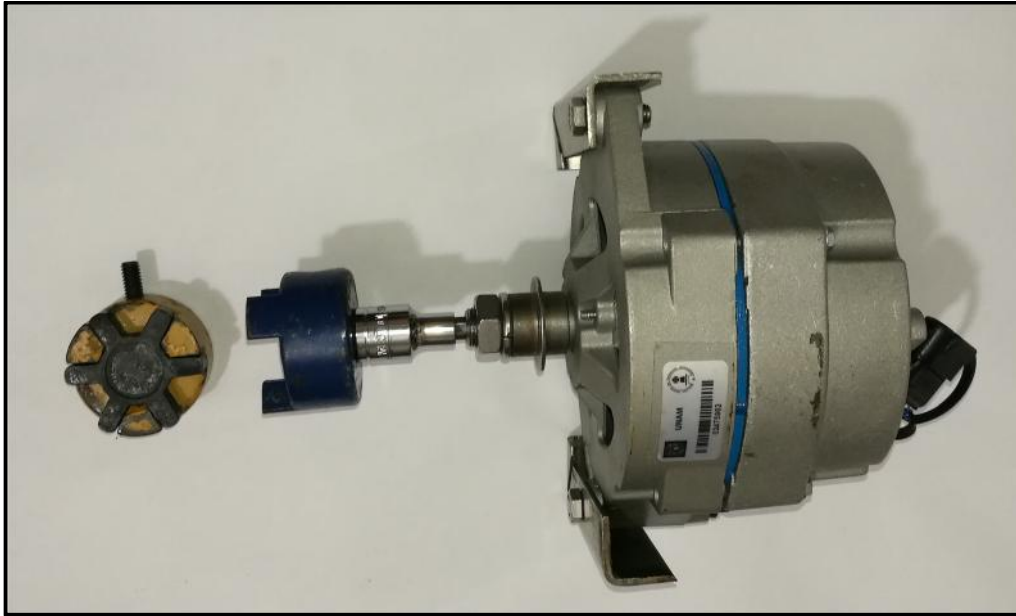


Figura 4.13 Acoplamiento instalado en eje de alternador

La parte restante del acoplamiento se instala en el eje de la turbina, para ello se alinea el eje y se introduce el perno como lo muestra la figura 4.14 una vez instaladas todas las piezas se aprieta el tornillo de sujeción, es necesario usar toda la oscilación de las piezas sin que esto suponga algún deterioro en las mismas.



Figura 4.14 Instalación del acoplamiento en el eje de la turbina

CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DE LA TURBINA DE VAPOR

Una vez que todos los componentes son colocados en la base de la turbina el acoplamiento final se muestra en la Figura 4.15, en este último paso se deben revisar todas las partes móviles, apretar todos los tornillos de presión. Ahora que todas las piezas están en su lugar se procede a hacer giros en diferentes direcciones con la finalidad de rectificar la correcta instalación de todos los componentes, desde el propio pontaje del eje en los baleros hasta el soporte correcto del alternador. Para finalizar la Figura 4.16 nos da una vista lateral de la turbina completamente armada.

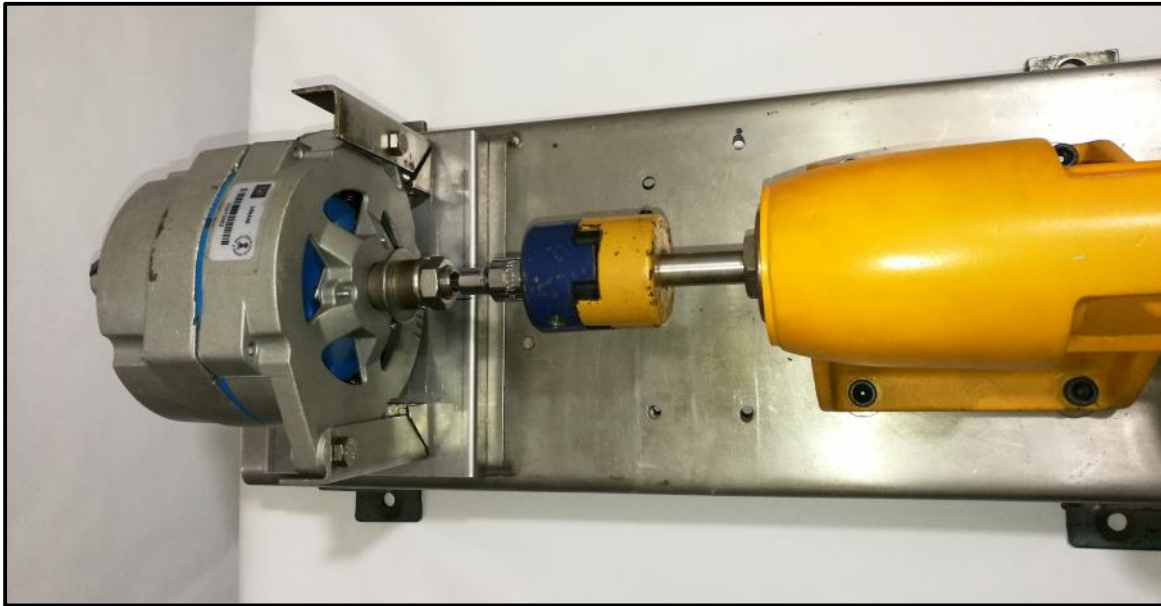


Figura 4.15 Montaje de acoplamiento de turbina con alternador



Figura 4.16 Armado final de la turbina

4.4. Elementos de control e instrumentación

Los elementos de instrumentación son:

- a) Voltímetro
- b) Amperímetro
- c) Tacómetro
- d) Luces indicadoras

Los elementos de control son:

- a) Apagado/encendido
- b) Paro de emergencia

Estos 6 elementos son colocados en un tablero de acero inoxidable, en su parte indicativa obtenemos los diferentes parámetros para la caracterización de la turbina en forma eléctrica y sus elementos de control nos permiten la interacción con la turbina. La Figura 4.17 muestra la disposición de los elementos de instrumentación y control



Figura 4.17 Tablero de control e instrumentación de la turbina



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El diseño y construcción de la turbina es el resultado general de este proyecto, engloba muchas disciplinas del área de la ingeniería, de diversos oficios y desde habilidades técnicas hasta artesanales. En conclusión es un proyecto multidisciplinario que logra la unificación de resultados prácticos y teóricos, en cada avance visibiliza el desconocimiento de áreas de la ingeniería más especializadas invitando al aprendizaje y fomentando a crear una solución aplicada.

En un análisis de los apartados se obtienen las siguientes conclusiones:

- El proceso de diseño de la turbina de vapor requiere un proceso alto de retroalimentación, es decir, la primera proyección de la turbina es sumamente diferente al proyecto final.
- Es necesario un avance a la par y complementario de los diseños con los pruebas realizadas en los aparatos.
- La parte de instrumentación es altamente útil para la construcción, es indispensable su puesta en marcha antes que la propia turbina para la obtención de parámetros y cálculos.
- La construcción de la turbina se logró sin materiales o equipos especializados resultando ser un proyecto accesible, dando pie a que cualquier estudiante pueda reproducir y/o mejorar el proyecto. Aunque existieron procesos que salen del marco de la ingeniería eléctrica no son considerados de un alto nivel de habilidades o difícil adquisición.
- El apartado de acoplamiento resulto ser el de mayor dificultad en el proyecto ya que no cuenta con antecedentes teóricos en la literatura. La propuesta hecha en la presente investigación resulto plenamente eficaz para unificar la parte mecánica con la eléctrica.
- Las variables que pueda presentar el tipo de vapor no son imprescindibles como se pensó en un principio, debido a la flexibilidad de la turbina en diferentes tipos de vapor además de que se puede trabajar con rangos estandarizados en las variables del mismo.
- Durante todo el proceso en especial de la construcción el acercamiento por parte de los usuarios finales (área docente y alumnado) fueron altos, por lo que se espera incentivar la construcción de nuevos prototipos.
- Es necesario la asesoría de expertos en diferentes áreas, en especial en la etapa de construcción: alta temperatura, seguridad industrial, diseño mecánico, manejo y soldadura de acero inoxidable, entre otros.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- Se cumplió de manera satisfactoria el principal objetivo de diseño y construcción de una turbina de vapor a nivel laboratorio y su adaptación a un generador eléctrico.

Existe un amplio número de mejoras que pueden realizarse en la turbina, la mayoría de ellos no son realizados debido al impacto económico que tendrían sobre el proyecto. El escalonamiento de la turbina para una mayor generación sin duda sería la más importante mejora a seguir, se enumeran las mejoras más representativas que se obtuvieron durante la realización de la tesis:

- Conversión de estator de acción a estator de reacción.
- Aumento en el número de rotores.
- Aumento en la longitud de los alabes.
- Empaques de laberinto para las fugas de vapor del rotor.

Existen otras modificaciones que son necesarias si es que algunos de los parámetros son modificados en pro de una mejor maquina térmica:

- Cambio de rotor: será necesario si la presión sube más de 260 psi por un material de hierro fundido ASTM A278 Clase 30B.
- Aislaciones de alta temperatura entre estator y cuerpo de la turbina.
- Paro de emergencia conectado a válvula de seguridad en la entrada del vapor.

Por ultimo existen modificaciones que pueden aplicarse para la versatilidad de la turbina:

- Cambio de alternador (embobinado).
- Cambio en el voltaje nominal de la turbina.
- Uso exclusivo de energía alterna (sin almacenamiento, solo producción).
- Cara transparente de tapa de estator para uso exclusivo con aire.



BIBLIOGRAFÍA

Alcaraz, E. 2013. Mantenimiento mayor a turbina de vapor Brown Boveri. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán, Edo. de México, México.

ALSTOM, 2010. Steam Turbine. Publicación de Alstom POWER. Levallois-Perret, Francia.

Álvarez, J. 2005. Máquinas Térmicas Motoras. Ed. Alfaomega. Barcelona, España.

Arpem, 2011. Audi A6 2011. Publicación de Arpem Networks. Madrid, España.

Callister, W. 2000. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. Reverté, Utah, EE.UU.

CFE. 2012. Nuestra misión. Publicación de la Comisión Federal de Electricidad. CDMX, México.

Chapman, S. 2012. Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill. CDMX, México.

Deeutschman, A. D., Michaels, W. J. y Wilson, C. E. 1996. Diseño de máquinas teoría y práctica. CECSA. CDMX, México.

DELCO REMY. 2011. Instruction Sheet. Publicación de Delco Remy. Indiana, E.E.U.U.

Días del Castillo, F. 2011. Diseño de elementos de Máquinas. Pub. Laboratorio de Tecnología de Materiales. Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán, Edo. de México, México.

Enríquez, G. 2009. Tecnologías de generación de energía eléctrica. Ed. Limusa, CDMX, México.

Fernández, D. 2011. Turbinas de acción. Atmosferis. Barcelona, España.

GEB, S.L. 2016. El Generador Eléctrico. Publicación de Generadores Eléctricos Bravo, S.L. Madrid, España.

Hall, A., Holowenko, A. y German, L. 1990. Teorías y Problemas de Diseño de Máquinas. McGraw-Hill. CDMX, México.

Hernández, S. 2007. Diseño e implementación de un corrector de factor de potencia trifásico con salida asimétrica de CD para aplicaciones automotrices. Tesis de



Licenciatura de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de las Américas. Puebla, México.

Leslie Goings, E. S. 1972. Automotive maintenance and trouble shooting. Publicaciones American Technology Society. Chicago, EE.UU.

Mataix, C. 2000. Turbomáquinas Térmicas. Ed. Limusa. Madrid, España.

Mateos, D. 2011. Turbinas de Reacción. Atmosferis. Barcelona, España.

Moran, M. 2005. Fundamentos de Termodinámica Técnica. Ed. Reverté. Barcelona, España.

Norton, R. L. 2011. Diseño de Máquinas. Un Enfoque Integrado. McGraw-Hill. Edo. de Méx, México.

NSK, 2017. Tipos de rodamientos. Publicación de NSK Motion and Control. Barcelona, España.

Planas, J. 2000. Introducción a la Instrumentación. Pub. Departamento de informática, Universidad de Valencia. Valencia, España.

Polo, M. 1984. Turbomáquinas de fluido compresible. Ed. Limusa. CDMX, México.

RENOVETEC, 2013. Turbinas de Vapor. Publicación de RENOVETEC. Madrid, España.

Rolle, K. C. 2006. Termodinámica. Pearson Educación. México.

Sánchez, T. 2004. Turbomáquinas Térmicas. Ed. Síntesis. Sevilla, España.

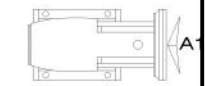
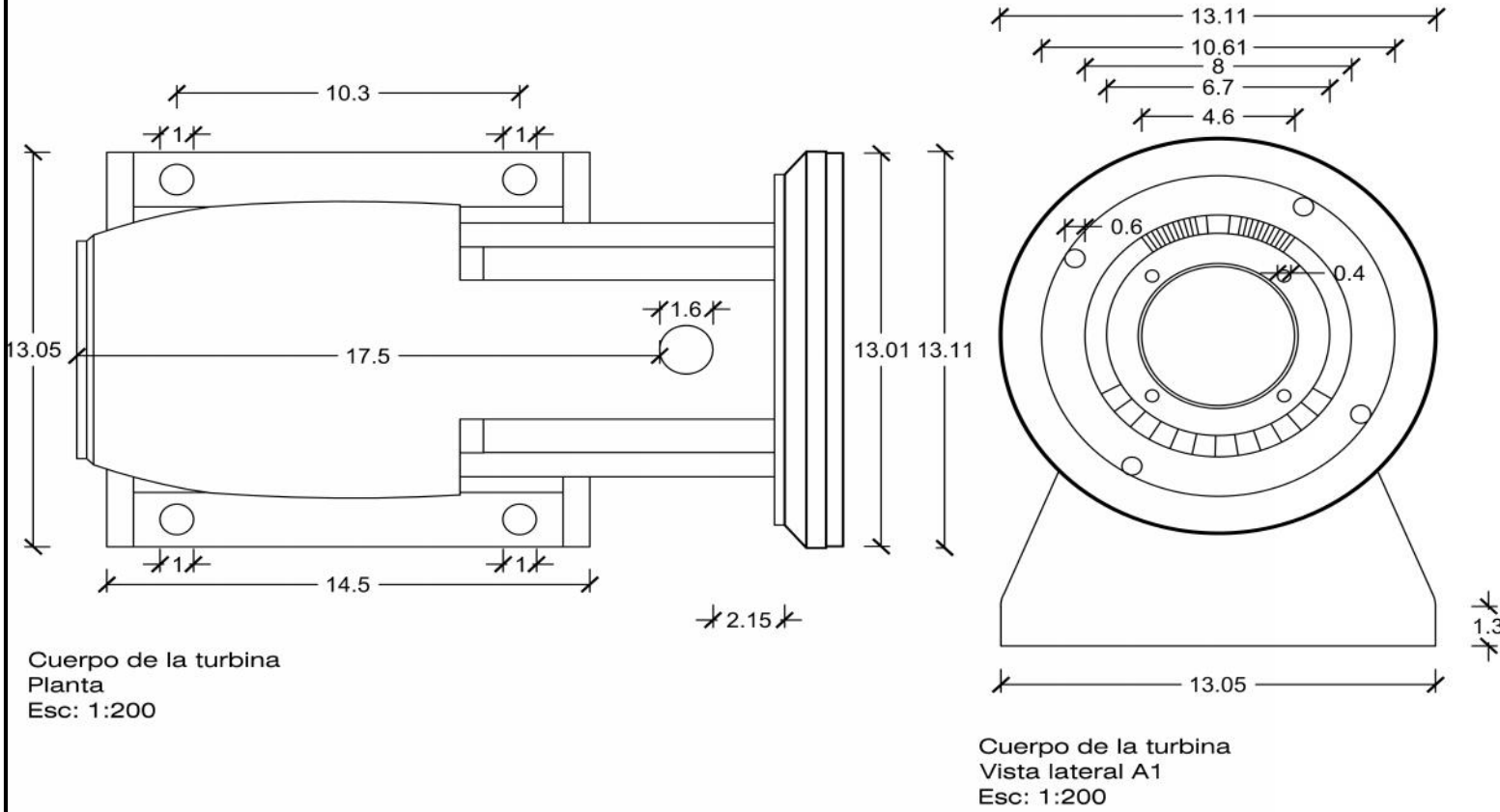
Santini, A. 2012. Automotive Electricity & Electronics. Cengage Learning, Inc. Nueva York, EE.UU.

SKF, 2016. Tipos y diseños de rodamientos. Publicación de SKF. Gotemburgo, Suecia.

SNMPE, 2010. La Electricidad. Publicación de la Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Electricidad. Lima, Perú.



ANEXO



Cuadro de materiales	
Item	Material
Cuerpo de Turbina	Hierro al carbon

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

PLANO:
CUERPO DE TURBINA

PROYECTADO POR: _____
 DISEÑADO POR: _____
 REVISADO POR: _____
 FECHA: JUNIO 2014

Escala 1:200 ADICIÓN: 01

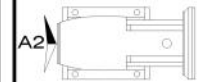
ESCALA NUMÉRICA

CLASE: TVL NO. PLANO: 01

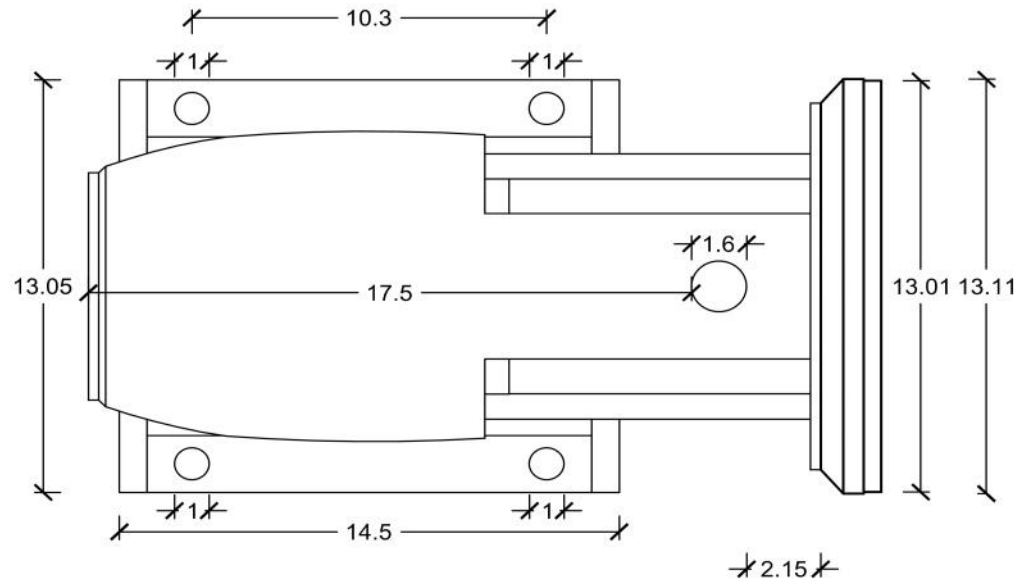
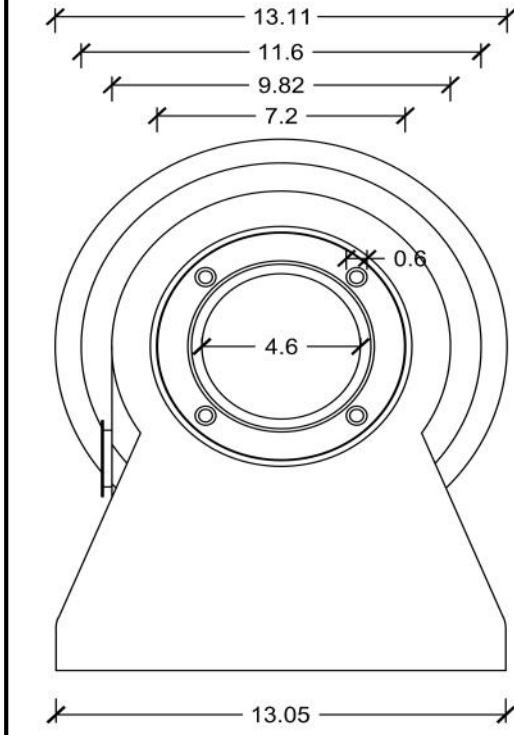
Figura A.1 Plano TVL 01 Cuerpo de la turbina



CIN Central de Instrumentación S.A. de C.V.



Cuadro de materiales	
Item	Material
Cuerpo de Turbina	Hierro al carbon



TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

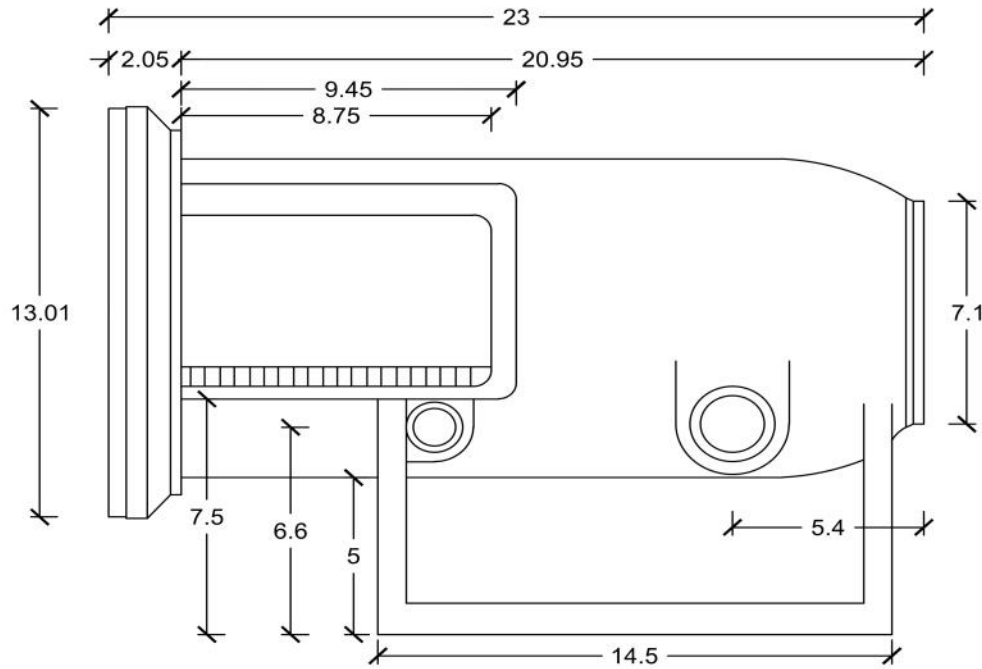
PLANO:
CUERPO DE TURBINA

PROYECTISTA: _____
 REVISOR: _____
 APROBADO: _____
 FECHA: _____

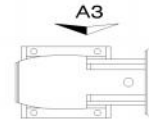
Escala 1:200

CLAVE: TVL 02

Figura A.2 Plano TVL 02 Cuerpo de la turbina



Cuerpo de la turbina
Vista frontal posterior A3
Esc: 1:200



Cuadro de materiales	
Item	Materia
Cuerpo de Turbina	Hierro al carbon

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

PLANO:
CUERPO DE TURBINA

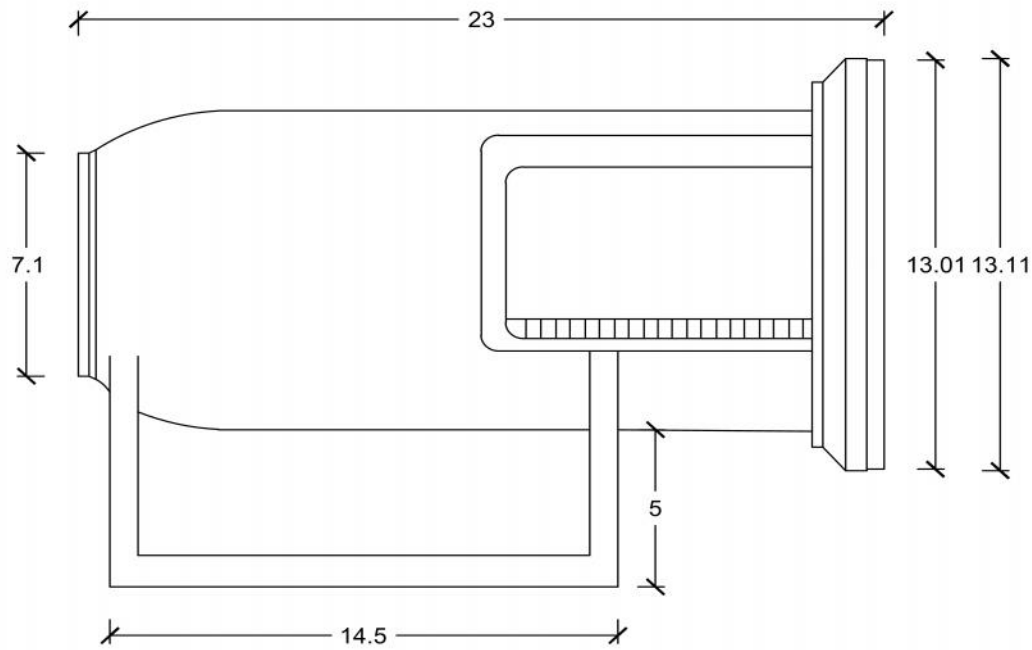
PROYECTADO: _____
 DISEÑADO: _____
 REVISADO: _____
 FECHA: JUNIO 2019

Escala 1:200 ACOPIADO: 034

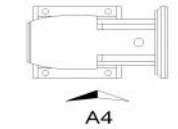
SECCION EMPLEADA: _____
 0.00 0.50 1.00 1.50 2.00

CLASE: TVL NO. PLANO: 03

Figura A.3 Plano TVL 03 Cuerpo de la turbina



Cuerpo de la turbina
Vista frontal anterior A4
Esc: 1:200



Cuadro de materiales

Item	Material
Cuerpo de Turbina	Hierro al carbón

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

PLANO:
CUERPO DE TURBINA

PROYECTO: NCV
DISEÑO: NCV
REVISIÓN: NCV
FECHA: JUNIO 2016

Escala 1:200 ACCIONES: CV



CLAVE: **TVL** DEL PLANO: **04**

Figura A.4 Plano TVL 04 Cuerpo de la turbina

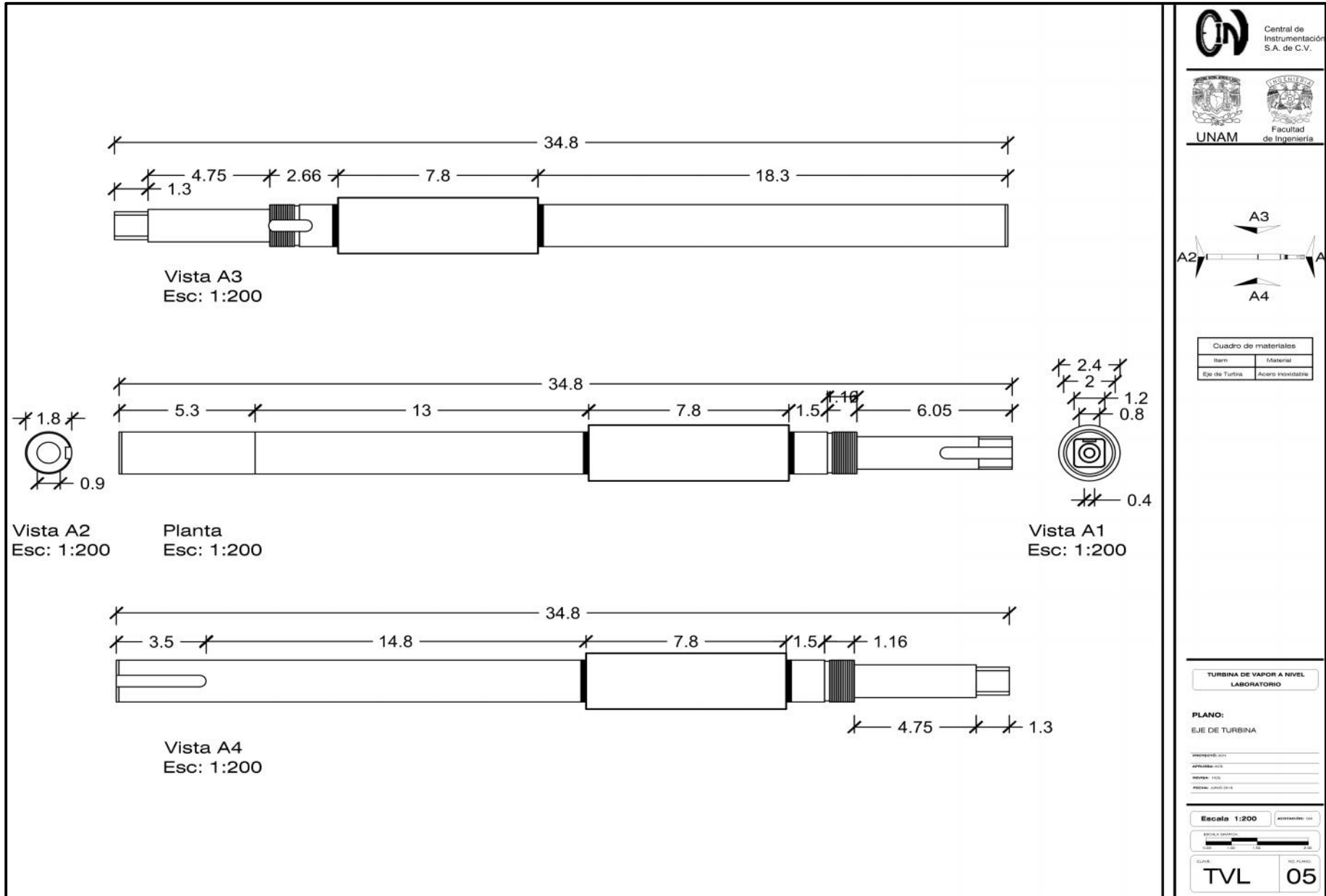


Figura A.5 Plano TVL 05 Eje de Turbina

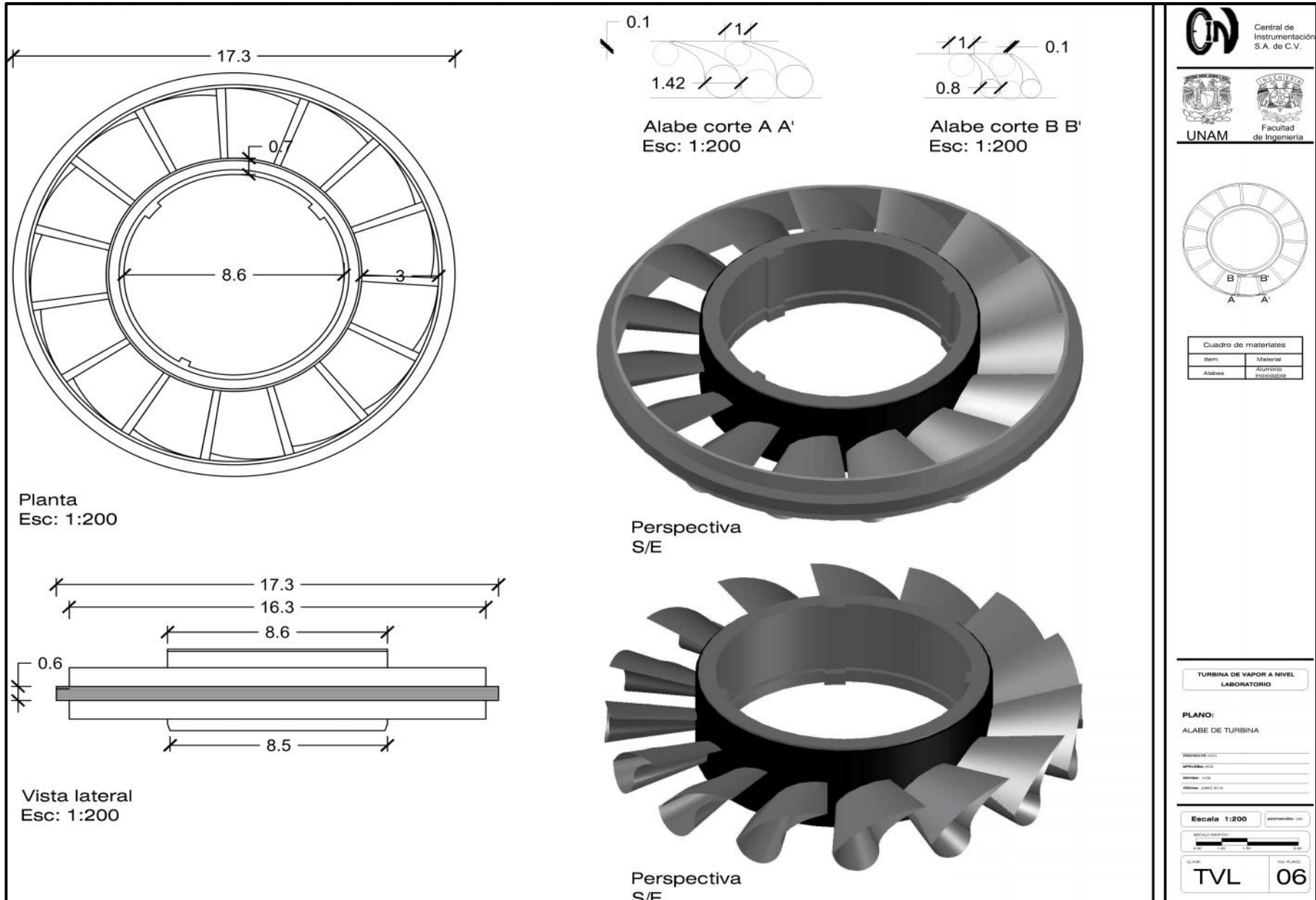
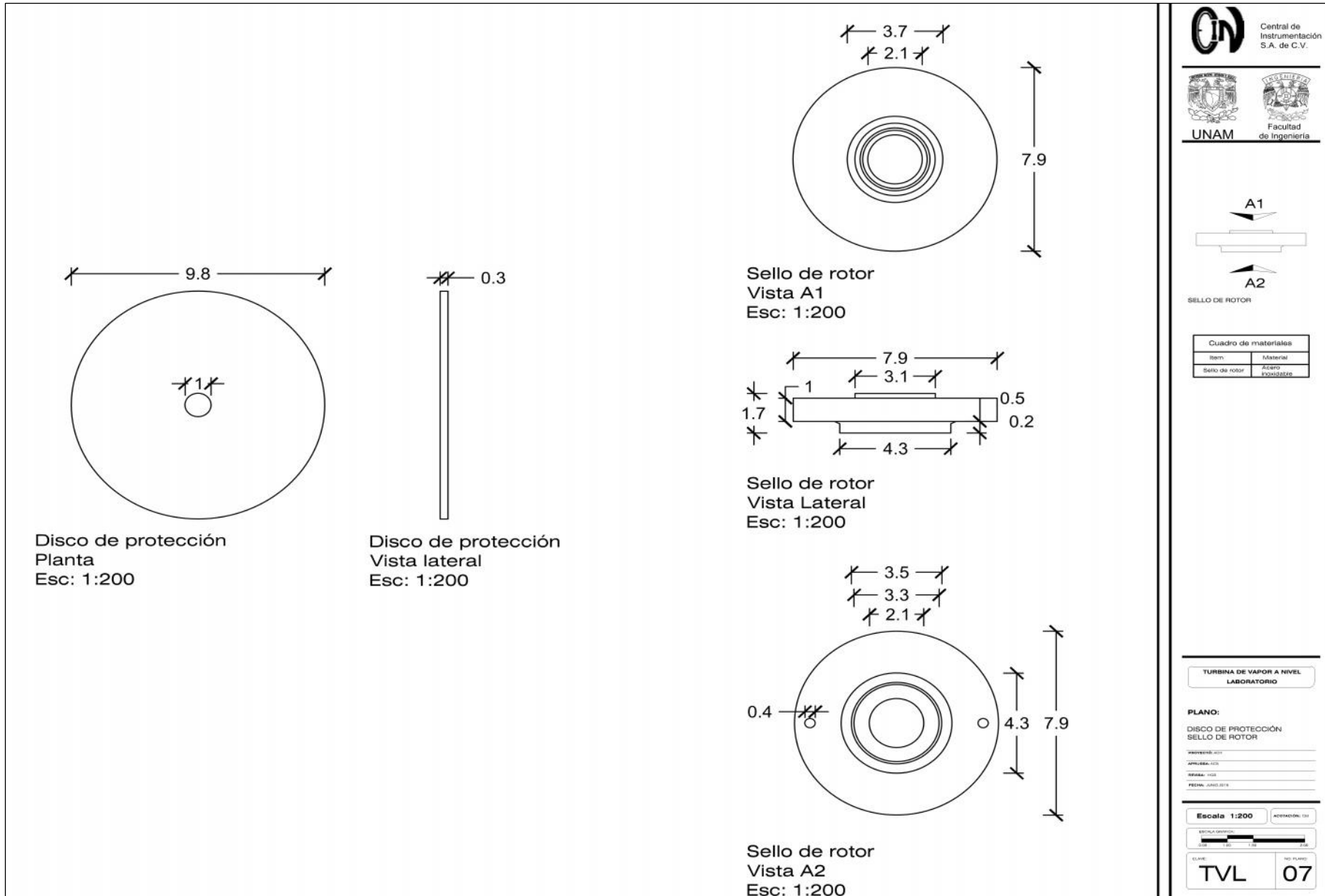


Figura A.6 Plano TVL 06 Álabes de Turbina

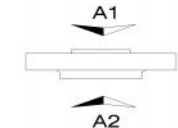


Central de Instrumentación S.A. de C.V.



UNAM

Facultad de Ingeniería



SELLO DE ROTOR

Cuadro de materiales	
Item	Material
Sello de rotor	Acero inoxidable

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

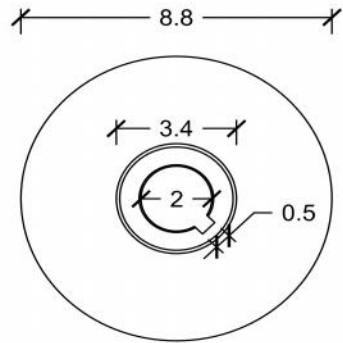
PLANO:
DISCO DE PROTECCIÓN
SELLO DE ROTOR

PROYECTANTE: JCS
APROBADO: JCS
REVISADO: JCS
FECHA: JUNIO 2016

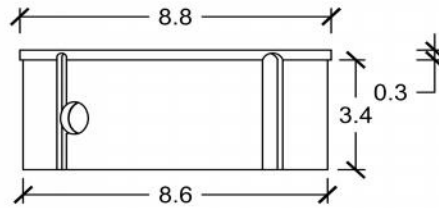
Escala: 1:200 ACOTACIÓN: 100

CLAVE: TVL NO. PLANO: 07

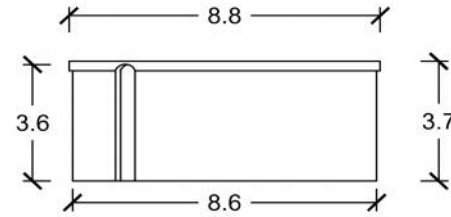
Figura A.7 Plano TVL 07 Disco de protección y sello del rotor



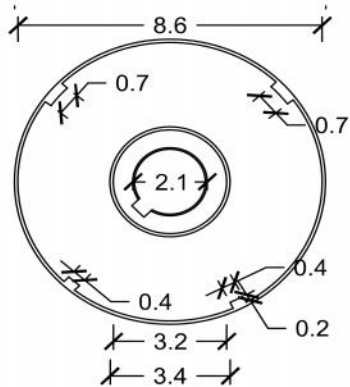
Masa de rotor
Vista Superior
Esc: 1:200



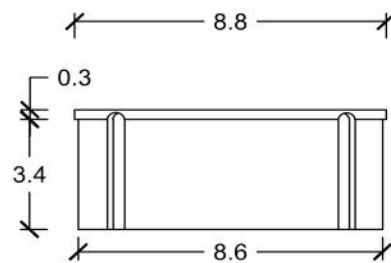
Masa de rotor
Vista A1
Esc: 1:200



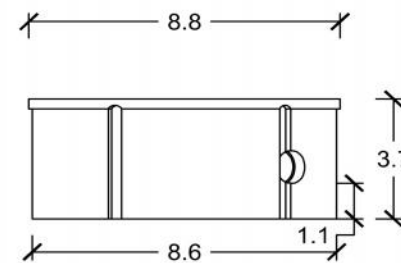
Masa de rotor
Vista A2
Esc: 1:200



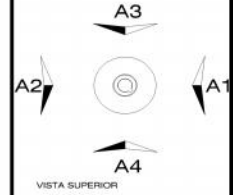
Masa de rotor
Vista inferior
Esc: 1:200



Masa de rotor
Vista A3
Esc: 1:200



Masa de rotor
Vista A4
Esc: 1:200



Cuadro de materiales	
Item	Material
Masa de rotor	Acero inoxidable

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

PLANO:
MASA DE ROTOR

PROFESOR: JAVI
APROBADA: HCB
REVISADA: FCB
DISEÑADA: JAVI
FECHA: JUNIO 2014

Escala 1:200

ESCALA GRÁFICA

CLAVE: TVL 08

Figura A.8 Plano TVL 08 Masa de rotor

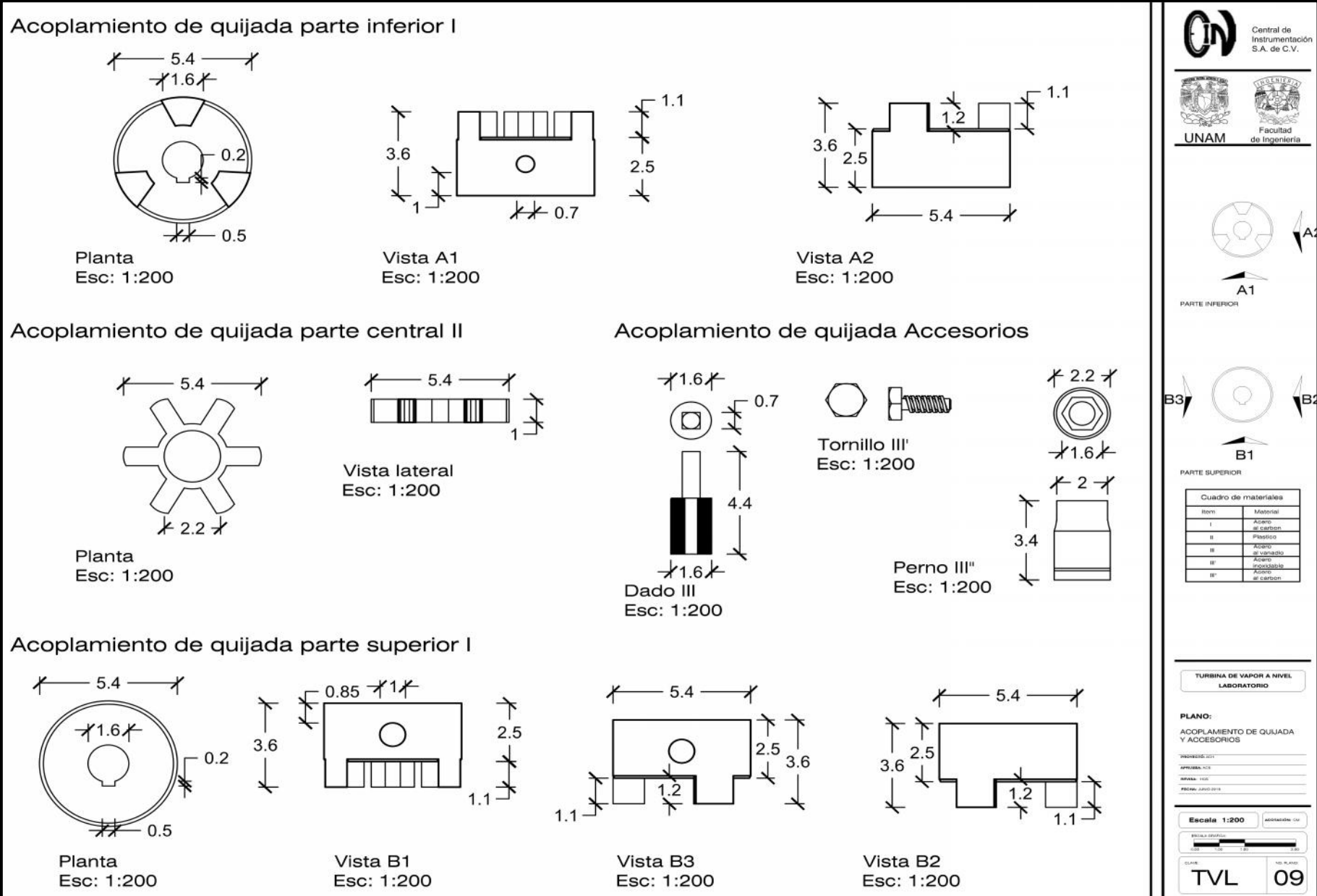


Figura A.9 Plano TVL 09 Acoplamiento de quijada y accesorios

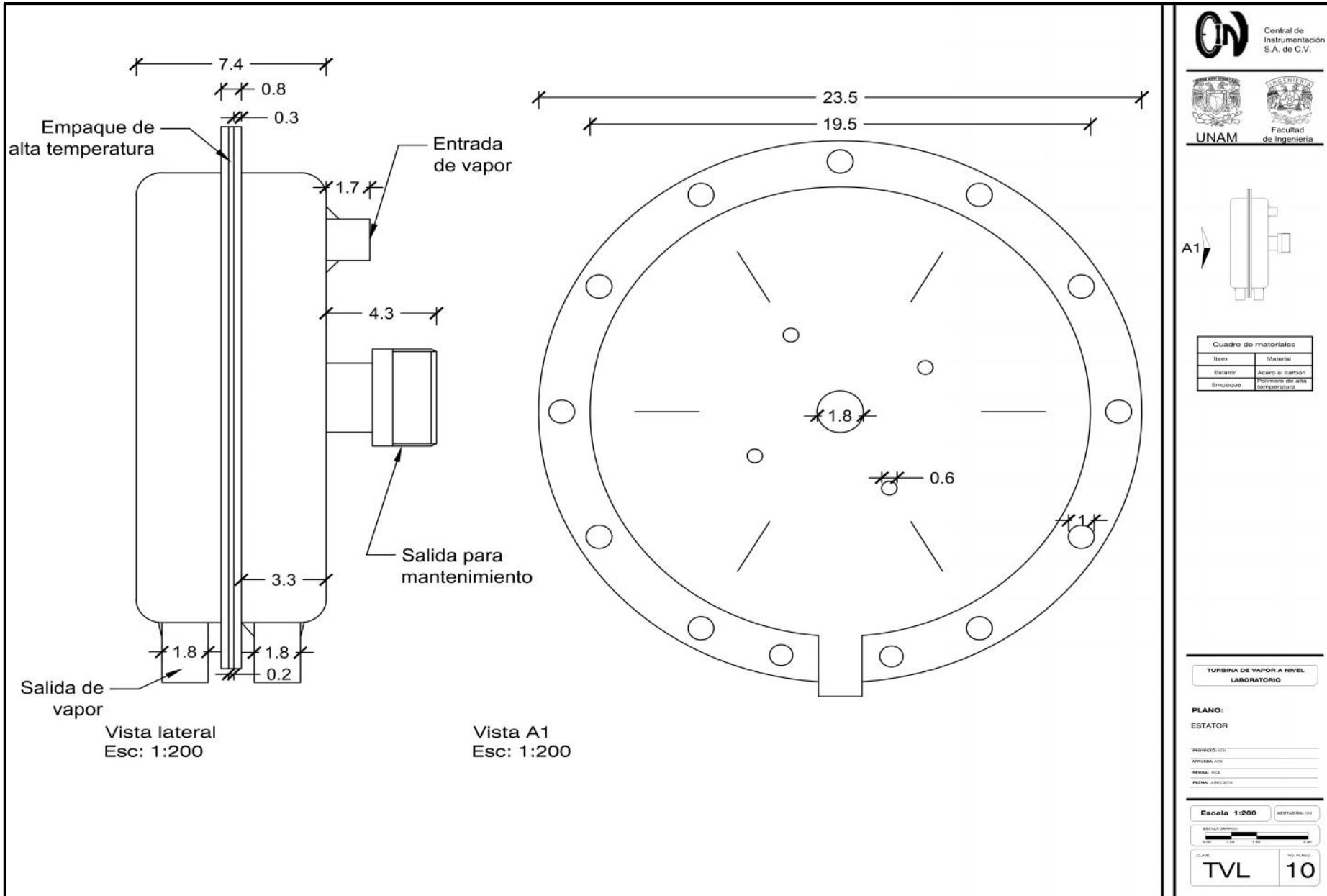


Figura A.10 Plano TVL 10 Estator Posterior

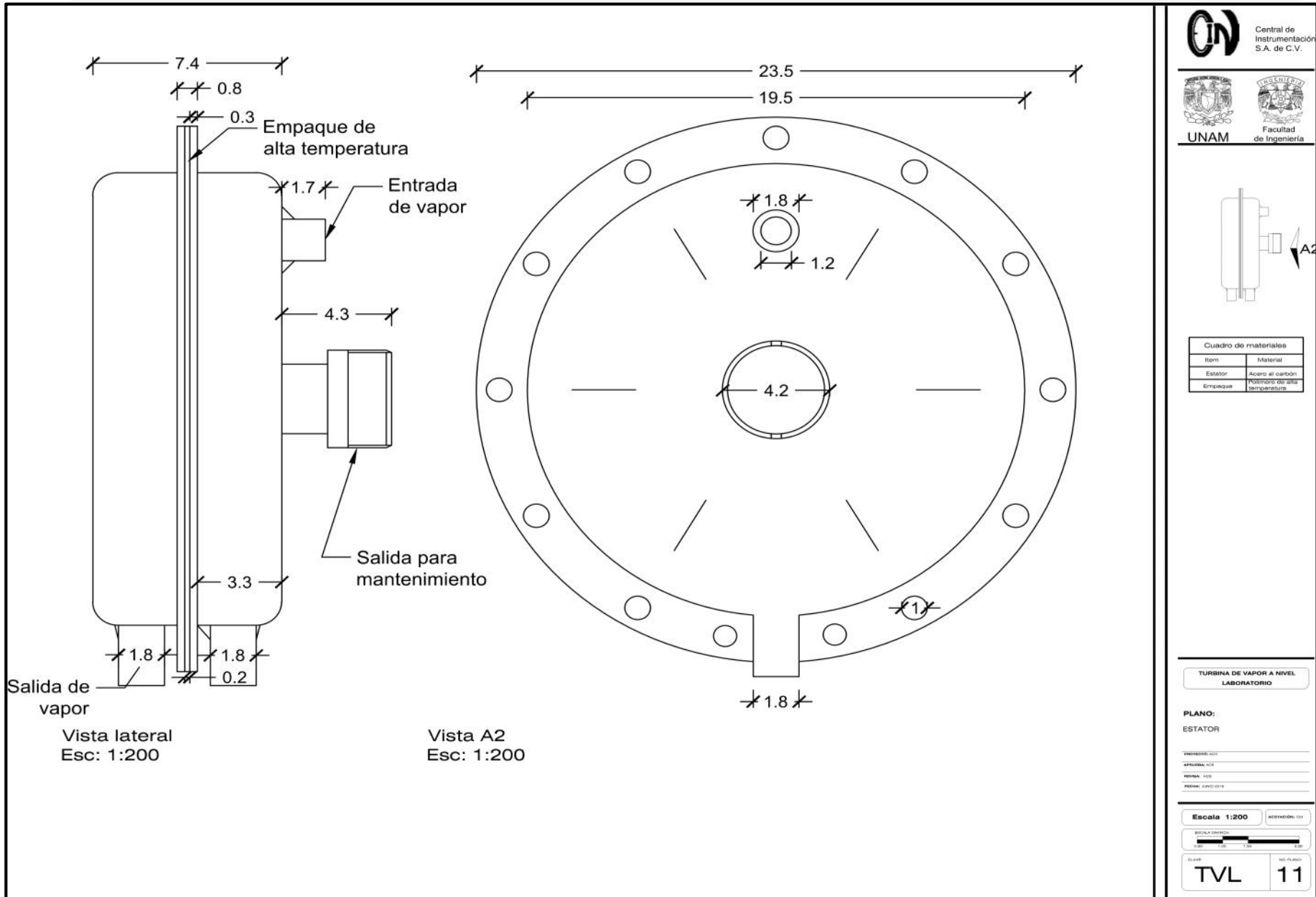


Figura A.11 Plano TVL 11 Estator Frontal

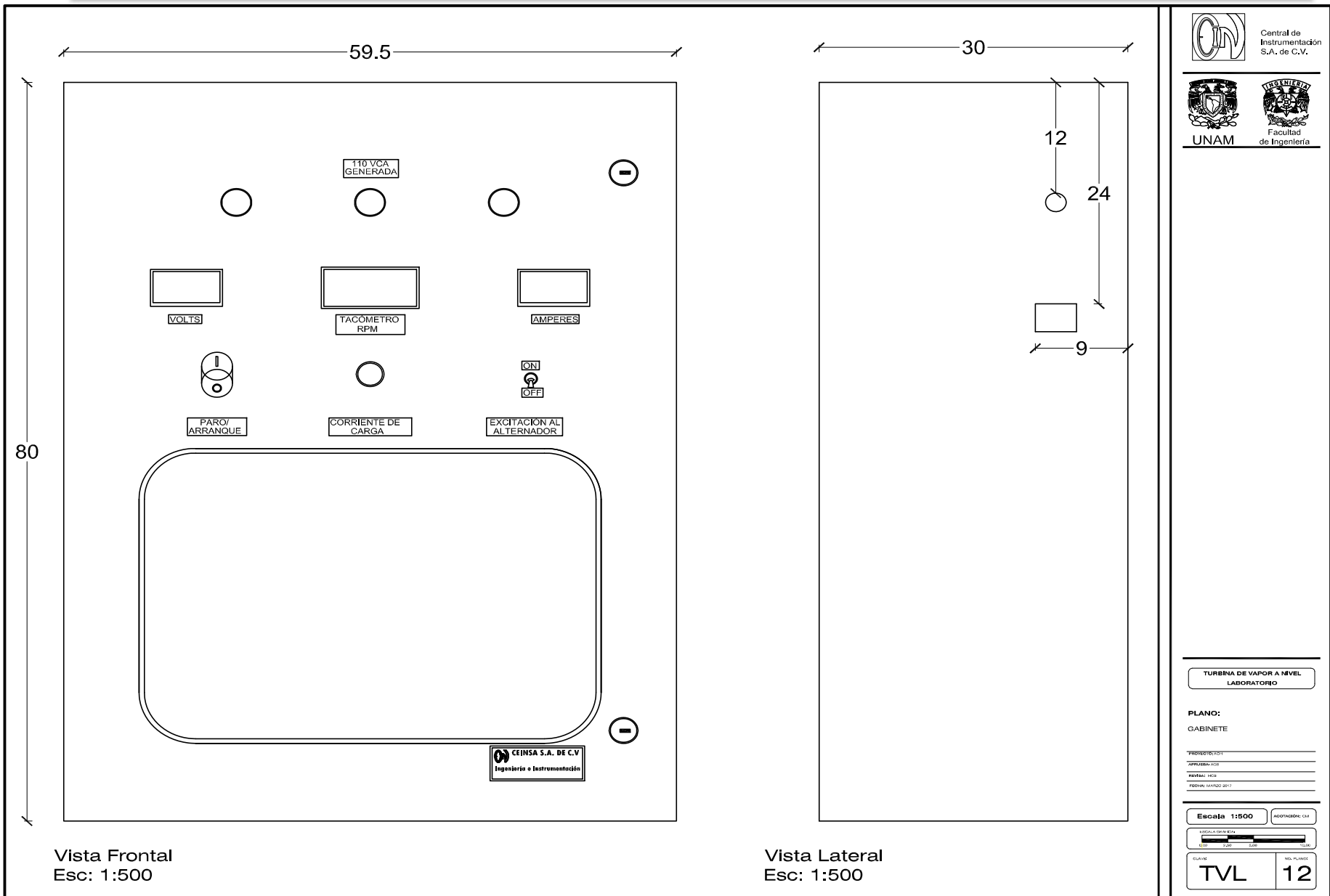
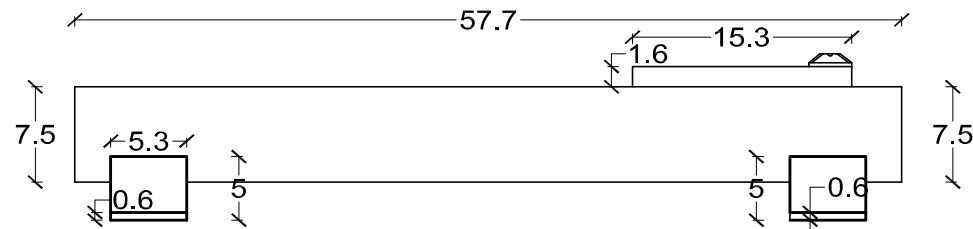
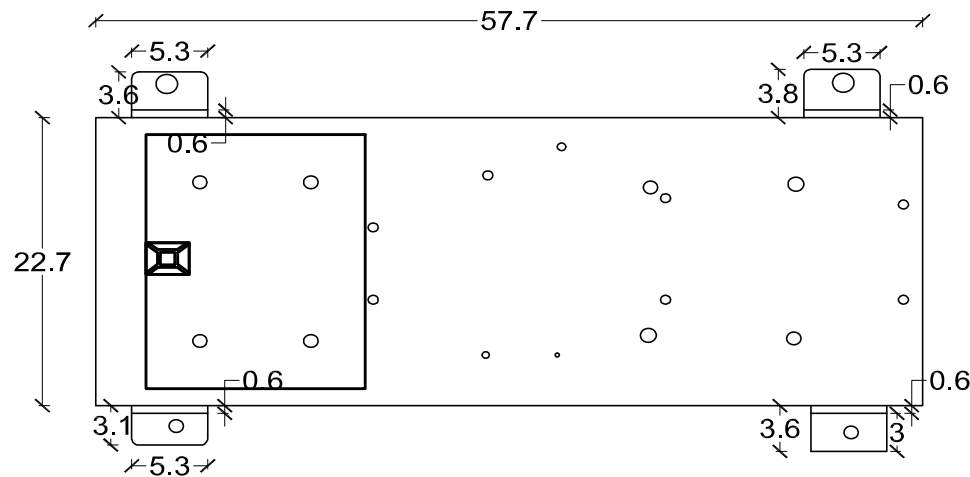


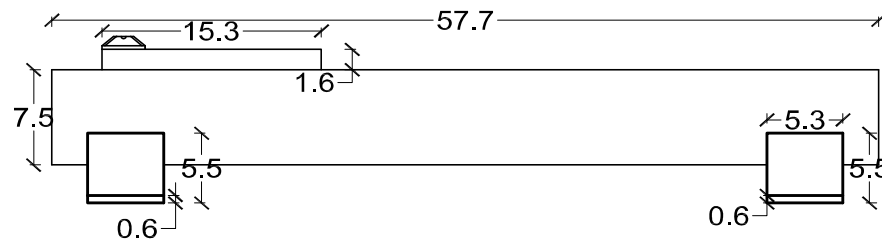
Figura A.12 Plano TVL 12 Tablero de control



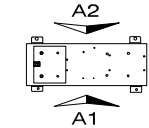
Vista A2
Esc: 1:500



Planta
Esc: 1:500



Vista A1
Esc: 1:500



Cuadro de materiales	
Item	Material
Base Turbina	Acero Inoxidable

TURBINA DE VAPOR A NIVEL
LABORATORIO

PLANO:
BASE DE TURBINA

PROYECTO: /
 APROBACION: /
 REVISOR: /
 FECHA: /

Escala 1:500 NOTACION CH



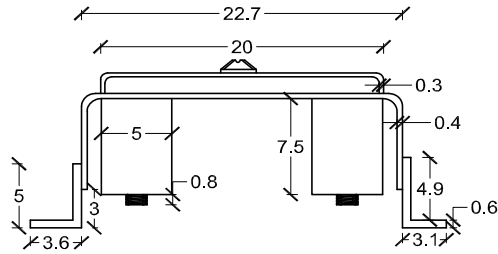
CADEN: TVL
 NÚMERO: 13

Figura A.13 Plano TVL 13 Base de turbina

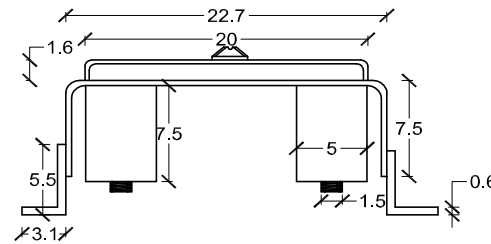


Central de Instrumentación S.A. de C.V.

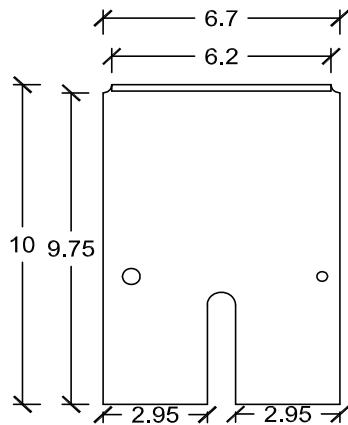
UNAM Facultad de Ingeniería



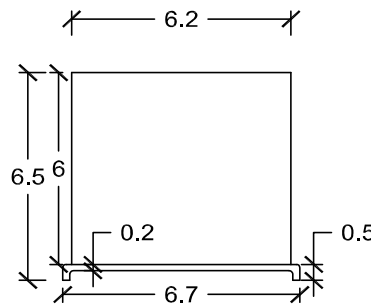
Base Turbina
Vista A3
Esc: 1:500



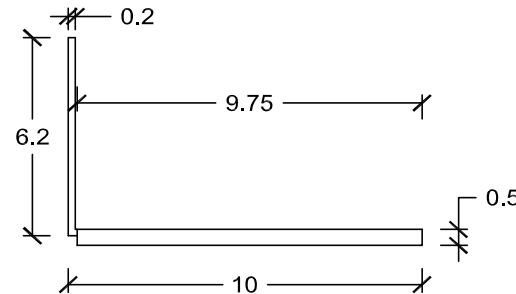
Base Turbina
Vista A4
Esc: 1:500



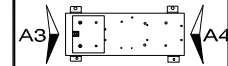
Base de Tacómetro
Planta
Esc: 1:200



Base de Tacómetro
Vista Frontal
Esc: 1:200



Base de Tacómetro
Vista Lateral
Esc: 1:200



Cuadro de materiales	
Item	Material
Base Turbina	Acero inoxidable
Base Tacómetro	Acero al carbon galvanizado

TURBINA DE VAPOR A NIVEL LABORATORIO

PLANO:
BASE DE TURBINA Y BASE DE TACÓMETRO

PROYECTADO:
APROBADO:
REVISADO:
FECHA: 2010

Escala 1:500 ADICIONADO: 011

ESCALA GRAFICA

CUVIL: TVL

HOLPLANO: 14

Figura A.14 Plano TVL 14 Base de turbina y base de tacómetro

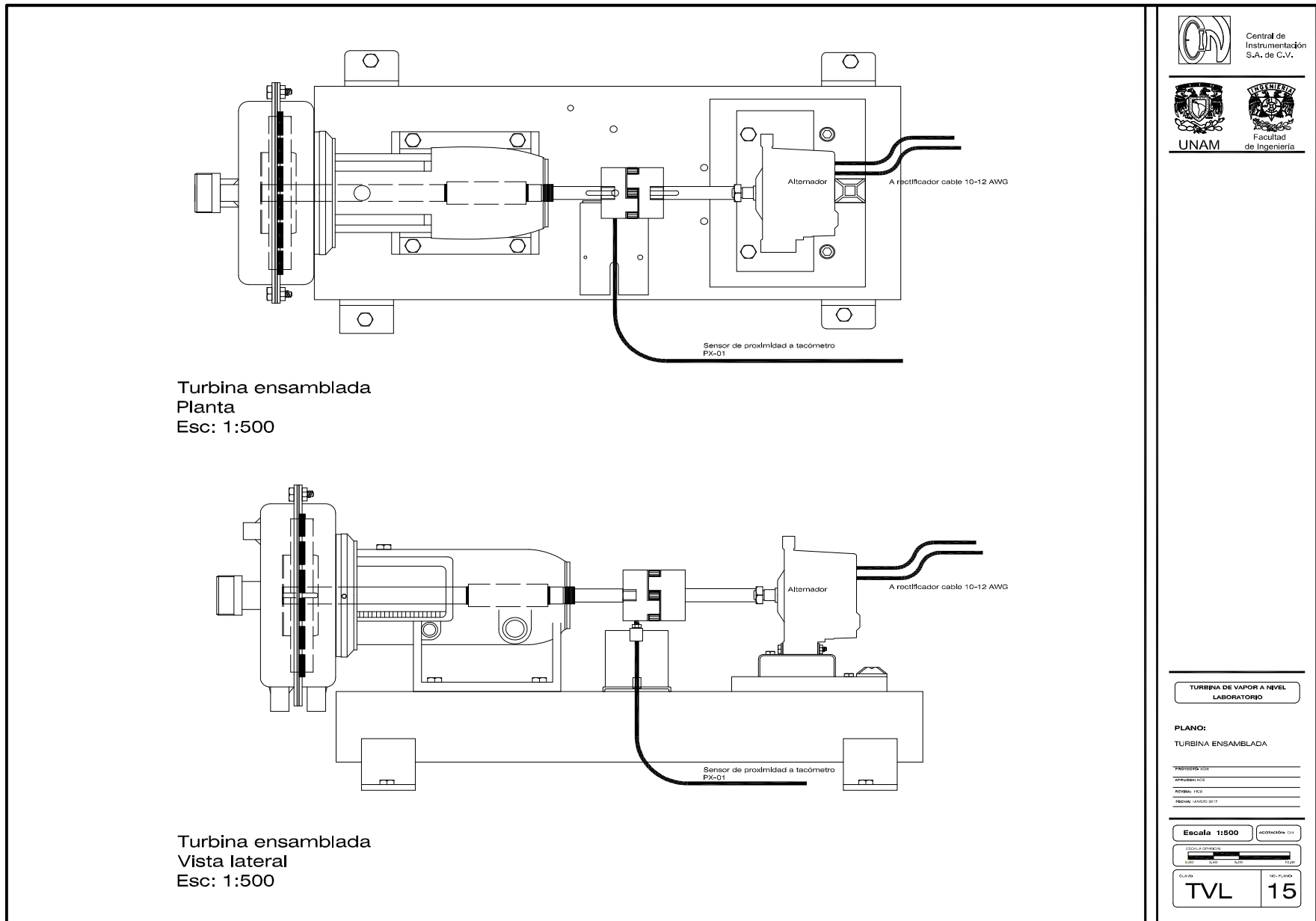


Figura A.15 Plano TVL 15 Turbina Ensamblada