

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**



**TRABAJO DE TESIS**

**REACONDICIONAMIENTO DE LOS ÁLABES DIRECTRICES DE UNA TURBINA  
HIDRÁULICA TIPO FRANCIS EN HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS Y SU  
ANÁLISIS DE COSTOS**

**INGENIERO MECÁNICO  
GUILLERMO RODOLFO RIVERA GUIROLA**

**GUATEMALA, MAYO 2009**

# ÍNDICE GENERAL

Abreviaturas y Símbolos	I
Índice de Figuras	II
Índice de Tablas	III
Glosario	IV
Introducción	X
Antecedentes	XI
Objetivos	XII
Justificación	XIII
Definición del Problema	XIV
Hipótesis	XV
1. Fundamentos Generales	1
1.1 Centrales Hidroeléctricas	1
1.2 Elementos y funcionamiento de una Turbina Francis	4
1.2.1 Tubería Forzada	5
1.2.2 Distribuidor	6
1.2.3 Rodete	8
1.2.4 Tubo de aspiración	10
1.3 Erosión	10
1.4 Cavitación	11
1.5 Precipitación de compuestos intersticiales en los aceros inoxidables	12
1.6 Formación de fases intermetálicas en los aceros inoxidables	14
2. Termorrociado	15
2.1 Rociado con Flama	16
2.2 Rociado con arco y alambre	17
2.3 Rociado con plasma	18
2.4 Rociado HVOF	19

3. Propuesta para el reacondicionamiento y análisis de costos	21
3.1 Identificación del material base	21
3.2 Chequeo de medidas iniciales	21
3.3 Proceso de reacondicionamiento	21
3.4 Preparación de la superficie	22
3.5 Proceso de soldadura	22
3.6 Selección del material de aporte	23
3.7 Parámetros de soldadura	26
3.8 Composición química de las superficies reparadas por soldadura	28
3.9 Tratamiento térmico post-soldadura	30
3.10 Acabados Finales	30
3.11 Recubrimiento termorrociado resistente a la cavitación y erosión	31
3.12 Análisis de costos	33
3.12.1 Reacondicionamiento de los álabes directrices	33
3.12.2 Reemplazo de los álabes directrices por álabes nuevos	34
Conclusiones	35
Recomendaciones	36
Bibliografía	37
Anexos	38

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

ASTM	Estandar americano de pruebas de materiales
AWS	Sociedad americana de soldadura
°C	Grados Celsius.
DIN	Norma industrial alemana (Deutsche Industria Normung).
°F	Grados Fahrenheit
m/seg	Metros por segundo
GMAW	Proceso de soldadura con arco de metal y gas de protección.
HVOF	Oxigeno-combustible a alta velocidad (High velocity oxi-fuel).
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
m	Metro
mg/h	Miligramo por hora.
MIG	Proceso de soldadura con arco de metal y gas inerte.
MW	Mega Vatios
kJ	Kilo Joule
km	Kilómetros
kW	Kilowatt
Psi	Libras por pulgada cuadrada
PWHT	Tratamiento térmico post-soldadura (Post weld heat treatment)
RPM	Revoluciones por minuto
SMAW	Proceso de soldadura con arco y electrodo revestido
ZAT	Zona afectada térmicamente

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una central hidroeléctrica	1
Figura 2. Selección de turbinas hidráulicas	2
Figura 3. Turbina Francis	4
Figura 4. Turbina Francis en semicorte	5
Figura 5. Tubería forzada en semicorte	5
Figura 6. Tubería forzada	6
Figura 7. Distribuidor de álabes directrices	7
Figura 8. Álabe directriz	8
Figura 9. Movimiento de apertura y cierre de los álabes directrices	8
Figura 10. Vista inferior del rodete	9
Figura 11. Vista lateral del Rodete	9
Figura 12. Curvas de sensibilización intergranular para distintos contenidos de carbono	13
Figura 13. Rociado con flama y alambre	17
Figura 14. Rociado con flama y polvos	17
Figura 15. Rociado con arco y alambre	18
Figura 16. Rociado con plasma	19
Figura 17. Rociado con HVOF	20
Figura 18. Desgaste en la bandera del álabe	24
Figura 19. Desgaste en la unión de la bandera con el eje inferior del álabe	25
Figura 20. Desgaste en la unión de la bandera con el eje superior del álabe	25
Figura 21. Diagrama de Schaeffler	29
Figura 22. Álabe nuevo	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero ASTM CA-6NM	21
Tabla 2. Composición química del electrodo AWS ER 308L	24
Tabla 3. Composición química del electrodo AWS ER 410 Ni-Mo	26
Tabla 4. Parámetros de soldadura para el microalambre AWS ER 308L	26
Tabla 5. Parámetros de soldadura para el microalambre AWS ER 410 Ni-Mo	27
Tabla 6. Composición química final en la bandera del álabe	28
Tabla 7. Composición química final en unión de la bandera con el eje del álabe	29
Tabla 8. Níquel y Cromo equivalente de los metales resultantes luego de la reparación	29
Tabla 9. Composición química del Stellite® 6	32

## GLOSARIO

**Acero martensítico:** acero con microestructura martensítica (estructura tetragonal centrada en el cuerpo). Son los más duros y resistentes, pero también los más frágiles.

**Álabes directrices o paletas directrices:** álabes que giran sobre su eje, para regular el flujo del agua que entra en la turbina Francis.

**Bandera:** en un álabe directriz, es la parte plana.

**Casa de máquinas o sala de máquinas:** recinto donde se encuentra instalado el conjunto de la turbina y generador.

**Caudal de turbinamiento:** cantidad de agua por unidad de tiempo que ingresa en la turbina.

**Cavitación:** formación y colapso violento de burbujas dentro de un fluido.

**Confiabilidad:** probabilidad que una máquina realice su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo las condiciones indicadas.

**Corrosión galvánica:** ataque y destrucción progresiva de un metal, resultante de un fenómeno de electrólisis entre dos metales de potencial eléctrico diferente que se hallan en contacto y en presencia de humedad.

**Disponibilidad:** porcentaje de tiempo total que se puede esperar que un equipo esté en condición de cumplir la función para la cual fue destinado. La disponibilidad no implica necesariamente que un equipo esté funcionando, sino que se encuentre en condiciones de funcionar.

**Embalse:** acumulación de agua producida por una obstrucción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce.

**Energía eléctrica:** forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos, cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico, y obtener trabajo.

**Energía cinética rotacional:** energía que posee un cuerpo que rota sobre su eje.

**Energía potencial del agua:** energía que posee el agua debido al salto o caída, medido desde la superficie hasta un nivel de referencia.

**Erosión:** proceso de pérdida de material, provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie.

**Fisuración por hidrógeno:** fisuración provocada por la acumulación de hidrógeno atómico que queda atrapado en dislocaciones, bordes de grano, inclusiones no metálicas, poros, y otros defectos, el cual se puede recombinar para formar hidrógeno molecular. En estas condiciones se pueden originar fisuras incluso sin la aplicación de tensiones externas, sino bajo la acción de tensiones internas residuales y de las tensiones ocasionadas por el propio hidrógeno acumulado.

**Generador eléctrico:** los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica.

**HVOF spray:** Proceso en el cual finas partículas, metálicas o no metálicas, fundidas o semifundidas, son rociadas a alta velocidad sobre una superficie para formar un recubrimiento denso, con muy baja porosidad y gran fuerza de adherencia, utilizando eficientemente una alta energía cinética y un calor controlado para producir un recubrimiento. Sus siglas en inglés significan: High Velocity Oxi Fuel Spray.

**Mantenimiento:** conjunto de actividades orientadas a la conservación, restauración y/o mejora de los equipos, de manera que puedan mantener su confiabilidad y disponibilidad a un nivel aceptable, cuidando su funcionalidad, seguridad, productividad, confort, imagen e higiene.

**Mantenimiento correctivo:** mantenimiento que tiene como fin corregir o reparar una falla en el equipo.

**Mantenimiento preventivo:** mantenimiento enfocado a prevenir la ocurrencia de fallas. Se conoce como Mantenimiento Preventivo Directo o Periódico por cuanto sus actividades están controladas por el tiempo. Se basa en la Confiabilidad de los Equipos y considera actividades como limpieza, lubricación y recambios programados.

**Material dúctil:** material que posee ductilidad. La ductilidad es la propiedad que presenta un material, cuando bajo la acción de una fuerza, puede deformarse sin romperse.

**Material frágil:** opuesto a un material dúctil, pues se rompe sin deformarse plásticamente o con muy poca deformación.

**Microalambre:** electrodo en forma de alambre para soldar con proceso GMAW.

**Onda de choque:** en la mecánica de fluidos, una onda de choque es una onda de presión fuerte que a través de un fluido, produce diferencias de presión extremas y aumento de la temperatura. Una de sus características es que el aumento de presión en el medio se percibe como una explosión.

**Plasma:** en física y química, se dice plasma a un gas constituido por partículas cargadas (iones) libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas.

**Precalentamiento:** en un proceso de soldadura, consiste en calentar la pieza que se va a soldar a una temperatura dada, antes de aplicar la soldadura, con el fin de lograr un enfriamiento más lento, y reducir el riesgo de fisuración.

**Presión de vapor:** a una temperatura dada, es la presión, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico, es decir que el líquido se evapora al mismo ritmo que la humedad se condensa, su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

**Programa de mantenimiento:** descripción detallada de las tareas de Mantenimiento Preventivo asociadas a un equipo, explicando las acciones, tiempos y recambios a utilizar.

**Protección catódica:** la protección catódica consiste en obligar a una estructura a funcionar como un cátodo en una celda de corrosión, mediante modificación de factores electroquímicos. Si un ánodo galvánico, también llamado ánodo de sacrificio, se conecta eléctricamente a una estructura sumergida en un electrolito, descargará una corriente que fluirá hasta la estructura que se pretende proteger.

**Reacondicionamiento:** consiste en restaurar una pieza dañada, con el objetivo de que vuelva a ser utilizable y extienda su vida de servicio.

**Rectificado:** trabajo realizado para ajustar las dimensiones y superficie de una pieza a sus medidas deseadas, eliminando las irregularidades.

**Revenido:** tratamiento térmico que tiene como fin reducir las tensiones internas de la pieza originadas por el temple, soldadura, o deformación en frío. Mejora las características mecánicas reduciendo la fragilidad, disminuyendo ligeramente la dureza.

**Rodete:** elemento móvil de la turbina o rotor, consiste en un disco perpendicular al eje de giro, compuesto por álabes curvados en dirección contraria al movimiento.

**Salto de agua:** paso brusco o caída de masas de agua desde un nivel a otro inferior. Numéricamente se identifica por la diferencia de altura que se da en metros.

**Sublimación:** o volatilización, proceso que consiste en el cambio de estado de la materia sólida al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.

**Temperatura de fusión:** temperatura a la cual el estado sólido y el estado líquido de una sustancia, coexisten en equilibrio térmico, a una presión de 1 atmósfera.

**Termorrociado:** proceso en el cual finas partículas, metálicas o no metálicas, fundidas o semifundidas, son rociadas sobre una superficie para formar un recubrimiento.

**Tobera convergente:** es un conducto, a través del cual pasa un fluido, con una sección de área decreciente en la dirección del flujo, para lograr un incremento en la velocidad del fluido.

**Tratamiento térmico:** proceso al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad.

**Tubería forzada:** cámara espiral en forma de caracol o voluta, cuya misión es repartir el caudal de agua a presión por toda la periferia del rodete de la turbina Francis.

**Turbinas tipo Francis:** turbina hidráulica de reacción, es decir, que el fluido sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete. Se aprovecha la energía potencial del agua y se transforma en energía cinética rotacional.

**Turbomáquina:** máquina cuyo elemento principal es un rodete o rotor, a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido, la cual puede ser en sentido máquina-fluido o fluido-máquina.

**Vida de servicio:** plazo de tiempo durante el cual un equipo conserva su capacidad de utilización. El periodo va desde su compra hasta que es sustituido o es objeto de restauración.

**Zona plástica:** de un material, es el rango de esfuerzos al que se somete una pieza para deformarla plásticamente, es decir, que al eliminar el esfuerzo la pieza ya no retornará a su forma original, pues queda una deformación permanente.

## INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica los Esclavos fue puesta en operación en el año 1966. Se ubica en la aldea Los Esclavos, municipio de Cuilapa, Santa Rosa. En verano opera como una central de regulación diaria y en invierno a filo de agua. La capacidad en el embalse de la presa es de 225,000 m<sup>3</sup>.

El agua es conducida a través de un canal a cielo abierto de 1.335 Km de longitud, luego pasa por una tubería forzada de 175 m de longitud, hasta llegar a la casa de máquinas donde se encuentran dos turbinas tipo Francis de eje vertical con capacidad de 7 MW cada una. El salto de agua que utiliza esta central es de 108 m, con un caudal de turbinamiento de 7.68 m<sup>3</sup>/seg por unidad.

Las piezas asociadas, al funcionamiento de una turbina Francis, están sometidas a un desgaste severo por cavitación y erosión, debido al colapso violento de burbujas de aire en las superficies metálicas y al impacto de partículas sólidas arrastradas por el caudal de agua.

Como consecuencia del desgaste producido a lo largo de varios años de operación, es necesario reemplazar las piezas deterioradas, dentro de las que se encuentran los álabes o paletas directrices.

El cambio de las paletas directrices representa un costo elevado debido al tamaño, el material de fabricación y gastos asociados a la importación.

El reacondicionamiento de los álabes directrices consiste en reponer el material perdido en las áreas que sufren mayor desgaste por la cavitación y erosión, permitiendo de esa manera extender la vida de servicio de las paletas, por otro periodo de tiempo igual al que durarían unas nuevas, teniendo como consecuencia, una reducción en los costos de mantenimiento. En este trabajo se describe el procedimiento y los materiales para realizar el reacondicionamiento, así como un análisis de costos que justifique el proyecto.

## ANTECEDENTES

En anteriores trabajos de mantenimiento correctivo realizados en la central Hidroeléctrica Los Esclavos, se ha tenido que sustituir los álabes directrices con desgaste severo por álabes nuevos.

Los mantenimientos preventivos se programan una vez cada 5 años, los cuales incluyen entre otros trabajos, el reemplazo de los álabes directrices.

El costo de un juego de estos álabes para una turbina es de USD 180,000 (incluyendo gastos de importación). En la Central Hidroeléctrica Los Esclavos, se cuenta con dos turbinas tipo Francis de 7 MW, por lo que el costo de los dos juegos de paletas directrices asciende a USD 360,000.

En el actual programa de mantenimiento no existe un procedimiento detallado para recuperación o reacondicionar estos álabes y extender su vida de servicio por un periodo mayor.

El no contar con una política de recuperación de piezas, ha hecho que se incurra en gastos muy altos cada vez que se realiza un trabajo de mantenimiento, pues esto no es más que el cambio de piezas, sin considerar que éstas pueden ser reacondicionadas.

# **OBJETIVOS**

## **GENERAL**

Proporcionar las bases técnicas que ayuden a la tarea de mantenimiento de las turbinas tipo Francis, en lo relacionado al reacondicionamiento de los álabes directrices, y evaluar el proyecto mediante un análisis de costos.

## **ESPECÍFICOS**

1. Definir un procedimiento y listado de materiales, para reacondicionar los álabes directrices de las turbinas tipo Francis, que han sufrido desgaste por erosión y cavitación en la Central Hidroeléctrica Los Esclavos.
2. Evaluar el trabajo de reacondicionamiento de los álabes directrices de la Central Hidroeléctrica Los Esclavos, mediante un análisis de costos.

## JUSTIFICACIÓN

En la Central Hidroeléctrica Los Esclavos, es necesario realizar un mantenimiento correctivo cada cinco años, que consiste en cambiar todas las piezas mecánicas asociadas a la operación de las turbinas tipo Francis. Dentro de estas piezas se incluyen los álabes directrices. El costo de un juego de 18 álabes directrices es de USD 180,000 para cada una de las dos turbinas que operan en esta central.

Para garantizar la eficiencia en la transformación energética en las turbinas hidráulicas, así como su confiabilidad y disponibilidad, es necesario desarrollar proyectos de mantenimiento que logren un resultado satisfactorio, y a la vez, sean justificables mediante un análisis de costos tanto del propio proyecto de mantenimiento como de la operación resultante de los equipos.

Es de suma importancia para la ingeniería de mantenimiento establecer propuestas para el reacondicionamiento de piezas, siempre que esto sea factible, esperando los mismos o mejores resultados que si se instalaran repuestos nuevos, con el beneficio adicional de un menor costo de reparación.

Considerando a la energía eléctrica como un recurso del cual dependen muchas actividades, una reducción de costos en la industria de generación, tiene un impacto positivo en toda la sociedad. De ahí la importancia de reducir costos, manteniendo siempre una disponibilidad y confiabilidad tan alta como sea posible.

## **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El problema en la actualidad es que se está incurriendo en costos muy elevados al momento de realizar mantenimientos correctivo-preventivos, los cuales se realizan cada cinco años. Estos mantenimientos constituyen el reemplazo de las piezas en servicio, por piezas nuevas.

No se ha considerado el reacondicionamiento de las piezas dañadas, para extender su tiempo de servicio, pues no se ha desarrollado un procedimiento, que proporcione las bases técnicas necesarias para reacondicionar y reutilizar los álabes directrices.

## HIPÓTESIS

¿Se podrían reducir costos en el mantenimiento de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica los Esclavos, mediante el reacondicionamiento de los álabes directrices, en lugar de su reemplazo por nuevos?

Para evaluar los resultados y validar la hipótesis, se establecen como variables independientes los costos de las alternativas de mantenimiento propuestas.

La estimación de costos se hará, bajo las mismas condiciones de análisis, tomando en cuenta los costos directos e indirectos, la inversión en el tiempo, la durabilidad esperada de la reparación, tiempos medios entre fallas e intervenciones de mantenimiento, entre otras.

Nuestra variable dependiente, será la comparación de las dos alternativas propuestas, es decir, el reacondicionamiento de los álabes contra la adquisición de álabes nuevos.

# 1. FUNDAMENTOS GENERALES

## CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central hidroeléctrica es aquella que se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua.

En una Central Hidroeléctrica, el agua es llevada por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central, donde mediante turbinas hidráulicas se produce energía mecánica rotacional, y luego, en los generadores se produce energía eléctrica.

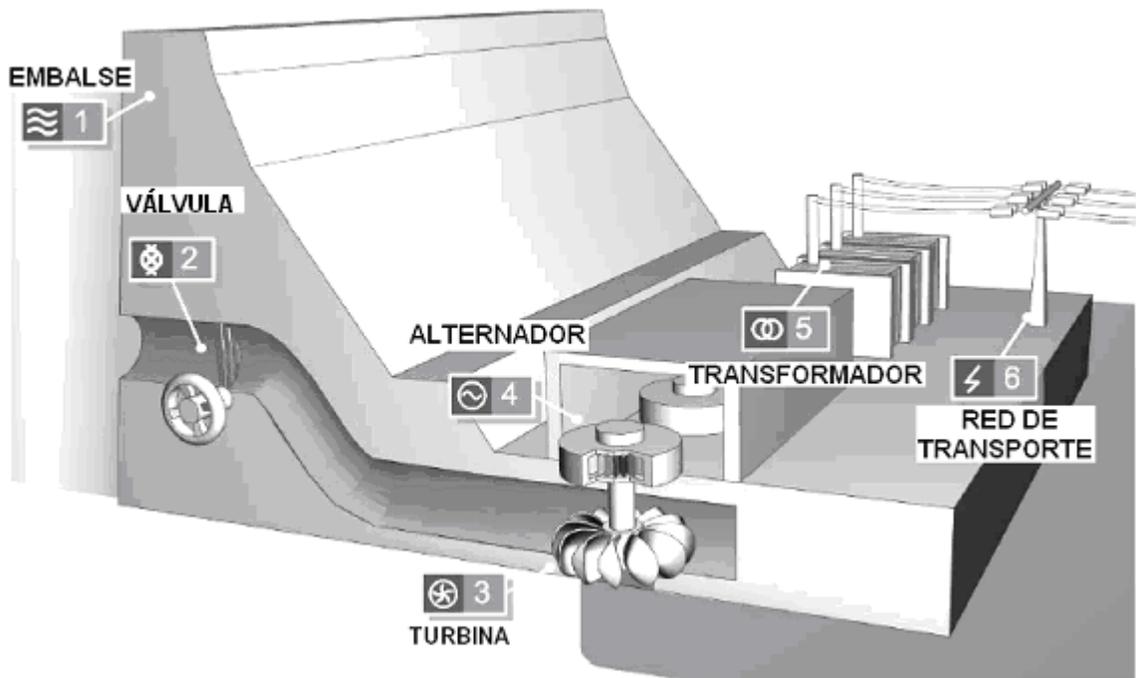


Figura 1. Esquema de una central hidroeléctrica. (Fuente: <http://www.unesa.net>)

El proceso de transformación energética, toma en consideración varios factores, dos de los más importantes son la caída (head) y la velocidad específica ( $n_s$ ), la cual se calcula con la siguiente formula:

$$n_s = \frac{n \cdot P_m^{1.25}}{Hn^{0.75}}$$

Donde: n es la velocidad de rotación [rpm]; Pm la potencia [kW]; y Hn el salto neto [m].

Estos factores son decisivos al momento de escoger el tipo de turbina hidráulica que se instalará en la planta, tal como se muestra en la siguiente gráfica, para saltos grandes se utilizan turbinas de acción tipo Pelton, para saltos medios turbinas tipo Francis y para saltos pequeños turbinas tipo Kaplan.

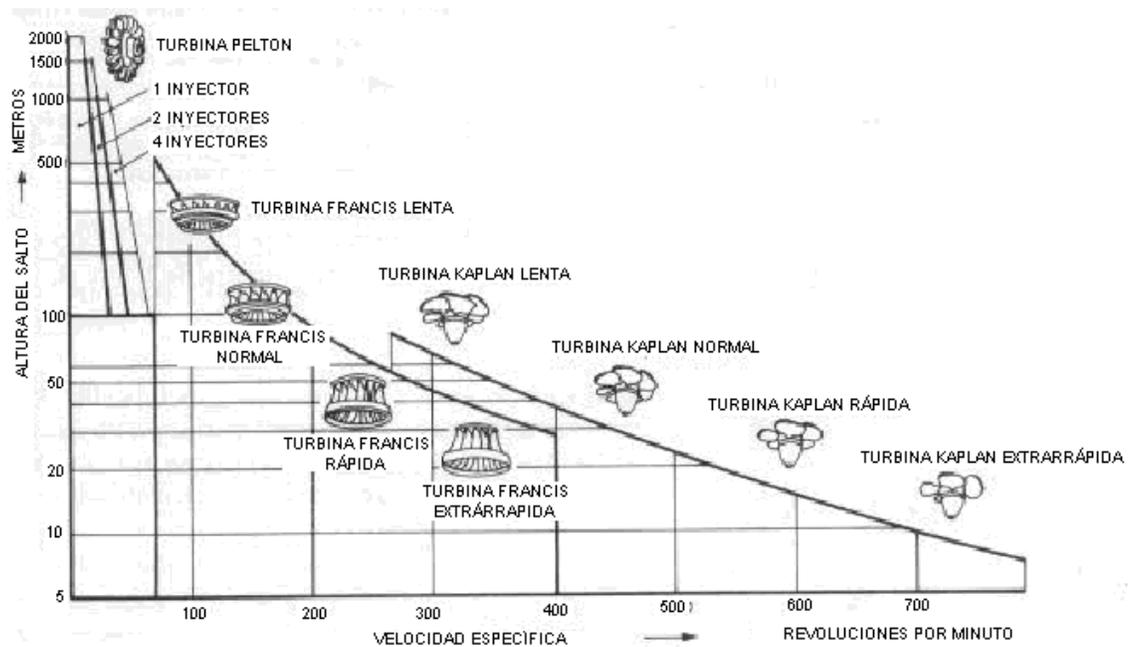


Figura 2. Selección de turbinas hidráulicas. (Fuente: <http://hdl.handle.net/2099.1/2632>)

## **Clasificación:**

En relación a su capacidad de generación, el INDE (Instituto Nacional de Electrificación) clasifica a las centrales hidroeléctricas de la siguiente manera: grandes, a las mayores a 50 MW, medianas a las que se encuentran entre 10 y 50 MW y pequeñas a las de menos de 10 MW.

Además de su capacidad, las centrales hidroeléctricas también se clasifican por su forma de operación:

**A Filo de Agua:** utilizan la cantidad de agua disponible del río en cualquier momento, está en capacidad de cubrir las necesidades de la demanda requerida; no poseen ningún tipo de almacenamiento y son plantas de pequeña potencia.

**Regulación diaria:** poseen un embalse de pequeña regulación utilizado a diario, esto quiere decir que se llena durante el día y se utiliza mayormente durante horas de mucha demanda, entre las 18:00 a 22:00 horas, y luego repite el ciclo.

**Regulación anual:** éstas son de mayor tamaño y necesitan un ambiente más amplio para su funcionamiento, debido a que es necesario acumular el agua dentro de un gran embalse, lo que permite su funcionamiento durante todo el año, pues capta el agua de la época lluviosa y la almacena durante la época seca.

Esto permite regular los caudales acumulados durante el Año. Este tipo de hidroeléctricas cubren la demanda básica y la de las horas pico (entre 18:00 y 22:00 horas), se construyen generalmente, en los ríos que mantienen su caudal en cualquier época del año.

En Guatemala, el lago de Amatitlán se opera como un embalse de regulación anual, éste alimenta al sistema Michatoya.

De acuerdo al salto de agua, las centrales hidroeléctricas se clasifican en:

**De alta presión:** más de 200 m.

**De media presión:** de 20 a 200 m.

**De baja presión:** menos de 20 m.

### ELEMENTOS Y FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA FRANCIS

Una turbina Francis es un motor hidráulico de reacción, que se emplea para caudales y alturas medias. El eje de la turbina se encuentra conectado al eje de un generador eléctrico (Ver figuras 3 y 4).

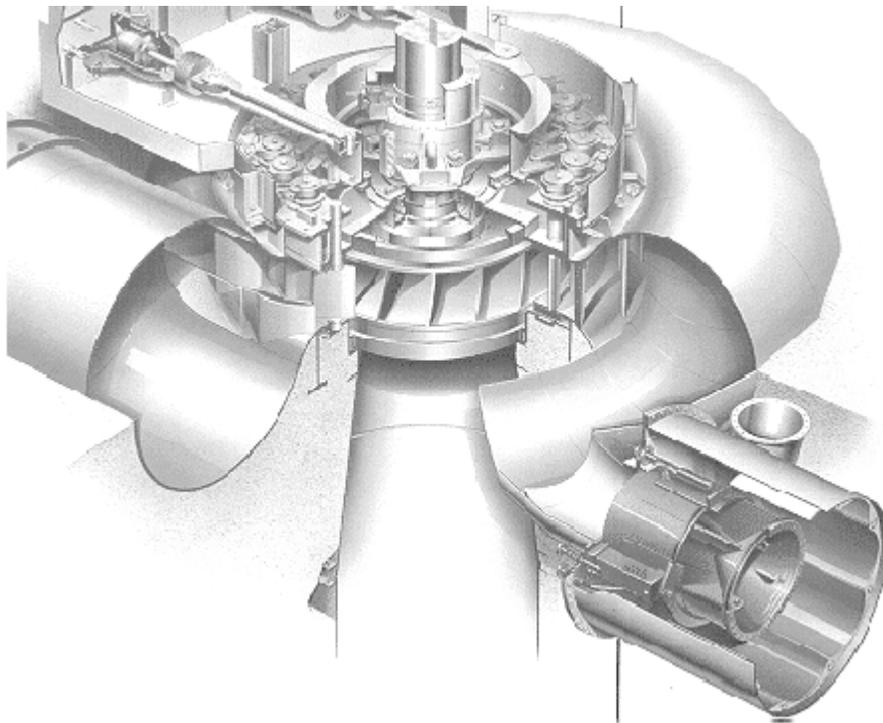


Figura 3. Turbina Francis (Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co>)

En la figura 4, está representada en semicorte axial una turbina tipo Francis. Se puede apreciar sus distintas partes, las cuales se detallan más adelante.

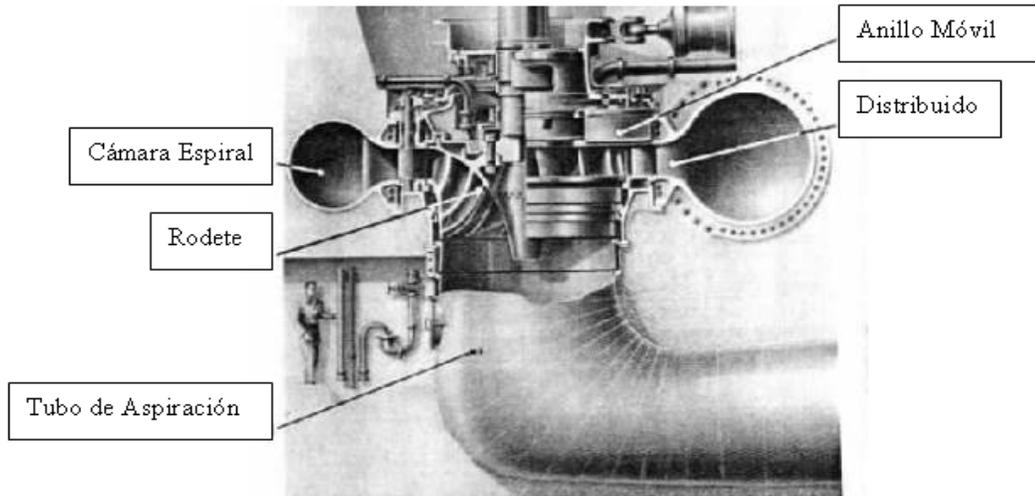


Figura 4. Turbina Francis en semicorte (Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co>)

### 1.2.1 TUBERÍA FORZADA

Es una cámara espiral en forma de caracol o voluta, cuya misión es repartir el caudal de agua a presión por toda la periferia del rodete.

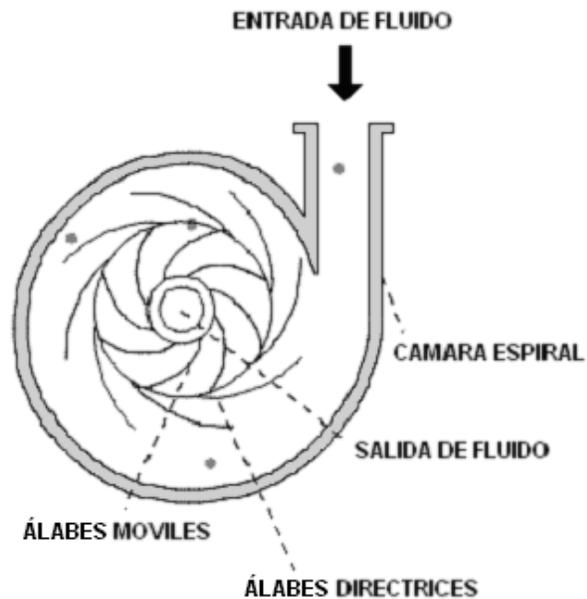


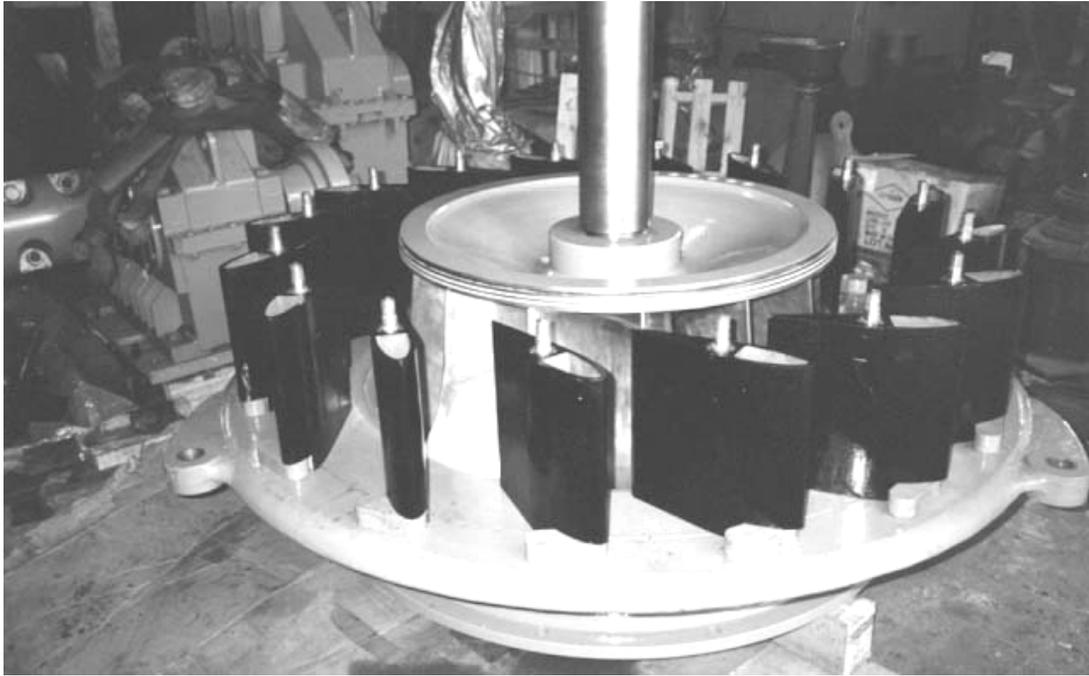
Figura 5. Tubería forzada en semicorte. (Fuente: [www.uhu.es](http://www.uhu.es)).



Figura 6. Tubería forzada. (Fuente: <http://www.ing.una.py>).

### 1.2.2 DISTRIBUIDOR

El Distribuidor es el conjunto de álabes directrices, situados en forma circular. Las paletas directrices regulan el caudal de agua que entra en el rodete, sin que las venas de fluido sufran desviaciones bruscas o contracciones, permitiendo un rendimiento elevado incluso con cargas reducidas. Estas directrices giran sobre su eje, de modo que pueden abrir o cerrar completamente el paso del agua hacia el rodete.



**Figura 7. Distribuidor de álabes directrices (<http://www.ing.una.py>)**

Cada una de las paletas directrices se mueve sobre un eje, de tal forma que llegan a tocarse en la posición de cerrado, en cuyo caso no entra agua en el rodete, y se van abriendo, a medida que giran, hasta llegar a la posición de máxima apertura, en cuyo caso el caudal de agua recibido por el rodete es máximo.

El conjunto de directrices del distribuidor se acciona por medio de un anillo móvil, al que están unidas todas ellas.

La misión de estas paletas o álabes directrices es doble:

- a) Encauzar el flujo hacia el rodete con la orientación adecuada, y
- b) Regular el caudal de agua (por tanto, la potencia suministrada).

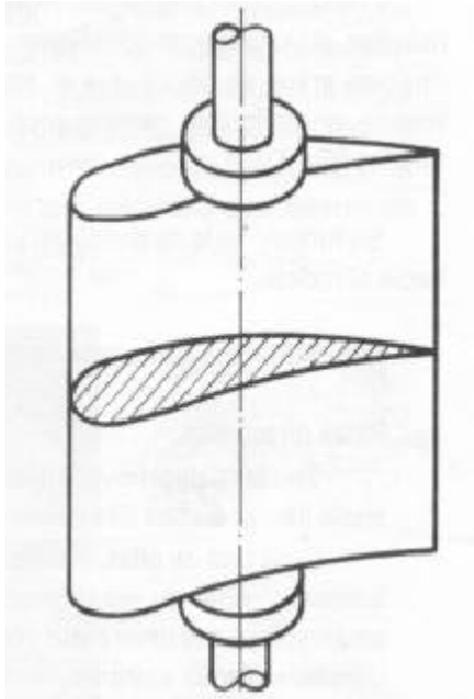


Figura 8. Álabe directriz. (Fuente: <http://hdl.handle.net/2099.1/2632>)

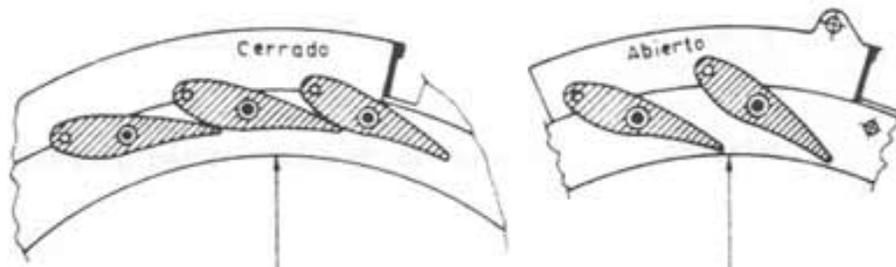


Figura 9. Movimiento de apertura y cierre de los álabes directrices. (Fuente: <http://hdl.handle.net/2099.1/2632>)

### 1.2.3 RODETE

El rodete es un rotor, es decir el elemento móvil de la turbina. Consiste en un disco giratorio, compuesto por álabes curvados en dirección contraria al movimiento.

En una turbina Francis, el flujo de agua entra tangencialmente al rodete y sale de él axialmente. El agua que pasa a través de el rodete y lo hace girar, es decir, que la energía potencial del agua se transfiere al rodete en forma de energía cinética rotacional.



Figura 10. Vista inferior del rodete. (Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co>)

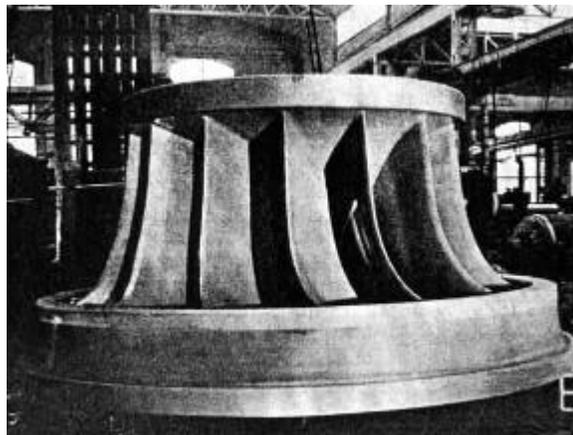


Figura 11. Vista lateral del Rodete. (Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co>)

#### **1.2.4 TUBO DE ASPIRACIÓN**

En turbinas Francis, el agua procedente de la tubería forzada se distribuye en la periferia del rodete, por medio de la cámara espiral y el distribuidor, y sale del rodete en forma axial, hacia el tubo de aspiración. El tubo de aspiración es entonces, la tubería por donde sale el agua a baja presión, luego de haber transferido su energía al rodete (Ver figura 4).

#### **EROSIÓN**

El desgaste por erosión se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie. Los materiales dúctiles parecen deformarse y posiblemente se endurezcan cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de aproximadamente  $20^\circ$ , el metal se elimina por una acción de corte.

Los materiales frágiles fallan por agrietamiento de las superficies cuando la fuerza de impacto es normal.

Se deduce que un componente dúctil finalmente se endurecerá por trabajo y fallará como si fuera frágil.

Siempre que se pueda, es necesario contar con un procedimiento programado de mantenimiento para restaurar las superficies dañadas por medio de un material resistente y fácil de aplicar.

## CAVITACIÓN

Cuando un líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido hierve y forma burbujas o “cavidades” de vapor, de ahí el nombre de cavitación. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, lo que provoca que las burbujas implosionen bruscamente.

Si las burbujas implosionan cuando están cerca o en contacto con una pared sólida, las fuerzas ejercidas dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones.

Se ha calculado que una burbuja en colapso rápido produce ondas de choque con frecuencias muy altas y presiones de hasta 410 MPa. Estas fuerzas son capaces de deformar varios metales hasta la zona plástica.

El daño por cavitación es una forma especial de corrosión-erosión, que ocurre en turbinas hidráulicas, hélices de barcos, impulsores de bombas y otras superficies sobre las cuales se encuentran líquidos de alta velocidad con cambios de presión.

Un daño por cavitación tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación. El daño por cavitación se atribuye parcialmente a efectos de desgaste mecánico.

La formación y colapso de un gran número de burbujas en una superficie dan lugar a esfuerzos localizados muy intensos, que parecen dañar la superficie por fatiga. Algunos materiales dúctiles pueden resistir el bombardeo por un período, llamado período de incubación, pero luego se endurecen y se comportan como frágiles. Los materiales frágiles pueden perder parte de su peso inmediatamente.

Cuando sea inevitable la presencia de la cavitación, el efecto sobre las superficies se puede reducir mediante el recubrimiento de materiales especiales de alta resistencia.

El empleo de pequeñas cantidades de aire introducidas en el agua reduce notablemente el daño causado por la cavitación: por último, en estudios recientes se ha comprobado que la protección catódica puede ser de utilidad contra los efectos de la cavitación.

El fenómeno de la cavitación ocasiona tres efectos nocivos en la operación de una turbomáquina: disminuye la eficacia, daña los conductos para el escurrimiento, produce ruido y vibraciones molestas. Los álabes curvos son particularmente susceptibles a la cavitación en su cara convexa, donde se pueden tener áreas sujetas a un picado fuerte e incluso a falla total.

### **PRECIPITACIÓN DE COMPUESTOS INTERSTICIALES EN LOS ACEROS INOXIDABLES**

Los elementos aleantes como el Cr, el Ti y el Nb, tienen una alta reactividad con el C y el N, componentes habituales del acero. Esta reactividad se incrementa con la temperatura, la mayor precipitación de carburos y nitruros tiene lugar cuando se alcanzan temperaturas en el rango de 500-800 °C, temperaturas que están presentes en las operaciones de soldadura.

La formación de carburos precipitados en borde de grano, tiene dos consecuencias negativas, por una parte se produce un empobrecimiento local de carbono, generando cristales frágiles intergranulares, lo cual disminuye la tenacidad y la ductilidad e incrementa la fragilidad y el riesgo de fisuras. Por otra parte se empobrece la zona en Cr, dando lugar a problemas de corrosión en la zona descromada.

Cuando se produce la formación de estos carburos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ), se dice que el material está sensibilizado.

Hay tres métodos generales para evitar o corregir la sensibilización:

**Tratamiento Térmico de Solubilización:** Consiste en calentar el acero ya sensibilizado hasta temperaturas por encima de 1000 °C. En este rango la austenita actúa como disolvente energético de los carburos precipitados, recomponiéndose la estructura. Al enfriar hay que pasar rápidamente por el rango de 800 a 500 °C para que no se repita de nuevo el fenómeno de sensibilización.

**Seleccionar aceros con poco contenido de Carbono:** Cuanto menor sea el contenido en carbono del acero, menores serán las posibilidades de que se combine con otros elementos reactivos.

En la figura 12, se puede observar que, a medida que disminuye el contenido de C por debajo de 0,03% el tiempo de sensibilización y el rango de temperatura disminuyen considerablemente.

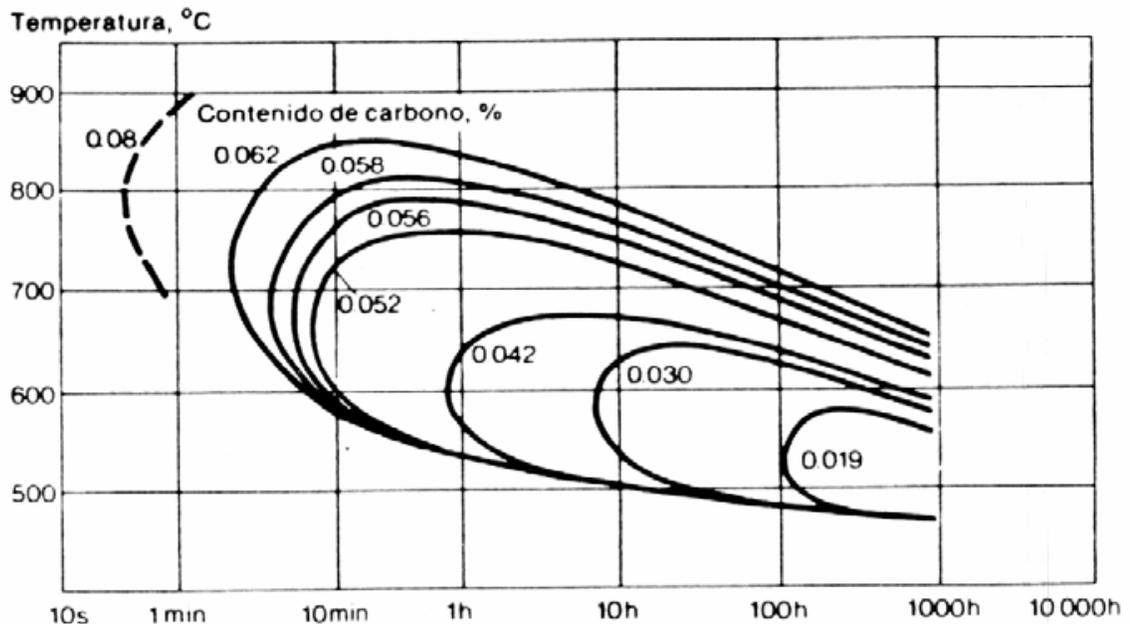


Figura 12. Curvas de sensibilización a la corrosión intergranular para distintos contenidos de C. ([www.dimf.upct.es/personal/JB\\_A/Tema\\_8.pdf](http://www.dimf.upct.es/personal/JB_A/Tema_8.pdf)).

Los de aceros de bajo contenido en carbono se denominan con la letra L de low carbon o ELC de extra low carbon. Hay que decir que muy bajos contenidos en carbono dan lugar a una disminución de propiedades mecánicas.

**Estabilizar los aceros inoxidables frente a la sensibilización:** Consiste en la aportación de elementos más reactivos con el C que el propio Cr, tales como el Ti y el Nb. Éstos generan unos carburos muy finos que quedan dentro de la estructura cristalina, no produciendo precipitados en borde de grano, aumentando al mismo tiempo la resistencia a la fluencia a alta temperatura o Creep.

No siempre esta solución es la óptima porque en algún medio ácido (como el ácido nítrico) los carburos de Titanio dan lugar a una corrosión muy localizada, en ZAT, afectando también a la ductilidad y a la tenacidad de la unión soldada.

### **FORMACIÓN DE FASES INTERMETÁLICAS EN LOS ACEROS INOXIDABLES**

Cuando el tiempo de permanencia en el rango 550-900 °C es suficientemente prolongado, puede provocar la formación de fases intermetálicas de características definidas, siendo la más conocida y frecuente la fase SIGMA ( $\sigma$ ). Esta fase tiene unas características de alta dureza y alta fragilidad, se compone básicamente de Cr y Fe, pudiendo estar presente el Mo, y se forma cuando el contenido en Cr es superior al 17%, mucho más fácilmente a partir de ferrita delta. La fase sigma da lugar a una disminución de la resistencia a la corrosión y produce un incremento de la fragilidad. .

Para que aparezca la fase sigma es necesario un periodo de inducción elevado, por lo que no suele formarse en las operaciones de soldadura. Cuanto mayor es el tiempo de exposición a la temperatura crítica, mayor es la cantidad de fase sigma formada.

## 2. TERMORROCIADO

El termorrociado es un proceso en el cual finas partículas, metálicas o no metálicas, fundidas o semifundidas, son rociadas sobre una superficie o sustrato para formar un recubrimiento.

Los recubrimientos no dejan las tensiones residuales asociadas al proceso de soldadura, debido a que no se funden con el metal base y tampoco lo calientan.

Los recubrimientos termorrociados están, generalmente, limitados a espesores muy bajos. Este límite puede ser tan bajo como 0.03 pulgadas, aunque en algunos casos se han aplicado recubrimientos de 1 pulgada.

Debido a las limitaciones de espesor, los daños por cavitación profunda deben ser reparados por soldadura. Sin embargo, los recubrimientos termorrociados pueden ser aplicados sobre las superficies previamente soldadas, para proveer protección adicional.

Los recubrimientos termorrociados también pueden ser aplicados directamente a una superficie rugosa y limpia, que no requiera soldadura previa.

Una vez aplicado un recubrimiento por termorrociado, éste prevendrá los daños en el material base. Debido a que el recubrimiento se convierte en la superficie activa, y futuras reparaciones del área afectada pueden realizarse usando termorrociado en lugar de reparar con soldadura.

Entre los procesos de termorrociado se encuentran:

- a) Rociado con flama (Flame Spray)
- b) Rociado con arco y alambre (Wire arc Spray)
- c) Rociado con plasma (Plasma Spray)
- d) Rociado con oxígeno combustible a alta velocidad (HVOF Spray)

## **2.1 ROCIADO CON FLAMA**

El rociado con flama usa la combustión de gases como fuente de calor para fundir las partículas que forman el recubrimiento.

Para la combustión se utiliza el oxígeno combinado con uno de los siguientes gases: acetileno, metilacetileno-propadieno-estabilizado, propano, hidrógeno o gas natural.

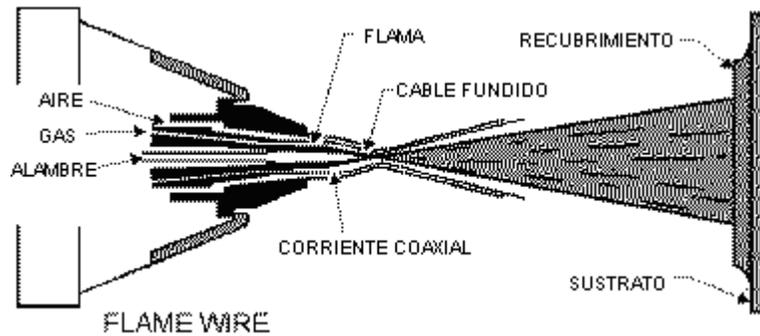
El acetileno es el más utilizado debido a que su flama produce la más alta temperatura. Cualquier material que no sublima, es decir, que no se transforme directamente de sólido a gas y que tenga una temperatura de fusión menor que 5000 °C, puede ser termorrociado.

La materia prima utilizada para formar el recubrimiento, puede ser en forma de alambre o en forma de polvos.

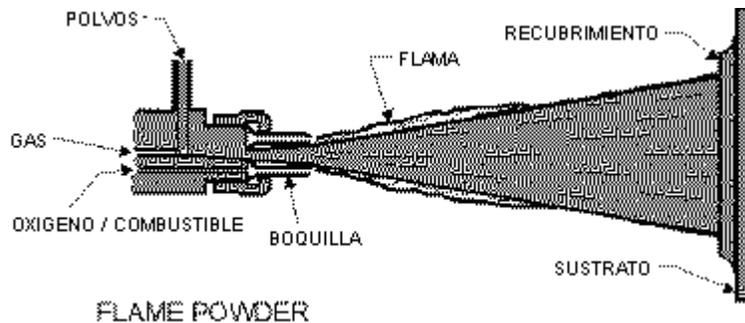
Cuando se utiliza alambre, el proceso se denomina “combustión wire flame spray”. En este proceso se usa una pistola con rodillos en la parte trasera, los cuales impulsan el alambre hacia una boquilla.

Cuando se utilizan polvos, el proceso se llama “combustión powder flame spray”. En este caso se utiliza una pistola que almacena los polvos en una tolva en la parte superior, o bien, una pistola que por medio de un sistema de alimentación por gas, transporte los polvos hacia la boquilla.

En ambos casos, en la boquilla una flama coaxial de gas en combustión, funde el alambre o polvo, según sea el caso. Una corriente de aire comprimido que envuelve la flama, impulsa y atomiza el material fundido.



**Figura 13. Rociado con flama y alambre. (Fuente: US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997).**

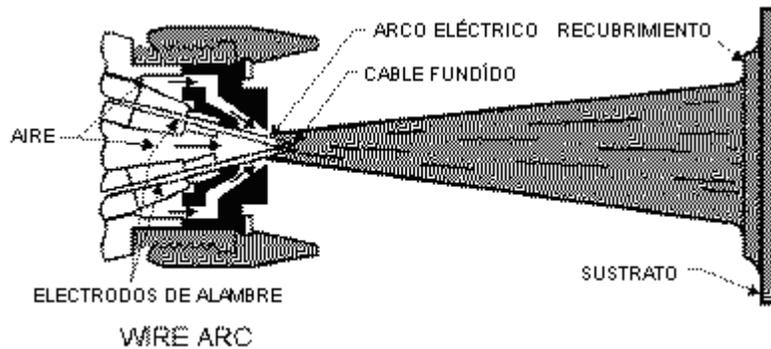


**Figura 14. Rociado con flama y polvos. (Fuente: US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997).**

## 2.2 ROCIADO CON ARCO Y ALAMBRE

Consiste en dos electrodos de alambre consumible, los cuales están separados uno del otro y avanzan automáticamente mediante un mecanismo, hasta encontrarse en un punto dentro de un chorro de gas a presión.

Una diferencia de potencial eléctrico de 18 a 40 voltios se aplica a través de los alambres e inicia un arco eléctrico que funde la punta de los mismos, y el chorro de gas a presión atomiza las gotas del metal fundido.



**Figura 15. Rociado con arco y alambre. (Fuente: US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997).**

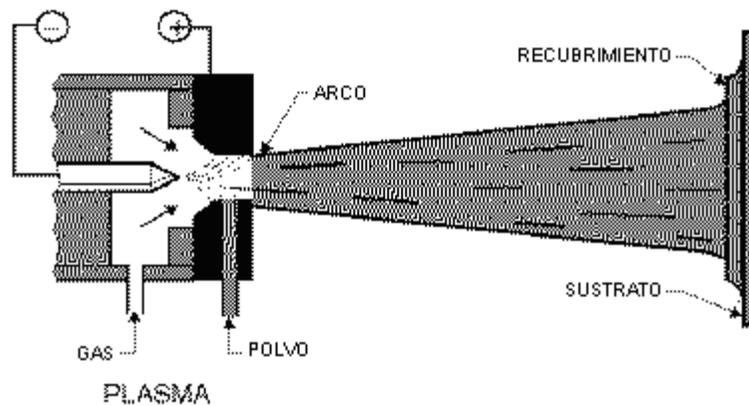
### **Características del recubrimiento rociado con flama o con Arco:**

Los recubrimientos termorociados con flama ó arco, son los de mayor porosidad y adherencia intermedia. En la mayoría de los casos, es necesario aplicar un material de interfase entre el metal base o sustrato y el recubrimiento aplicado, para mejorar su adherencia y brindar mejor protección. El promedio de fuerza de adherencia entre la capa y el sustrato es de entre 4,500 a 9,000 psi.

### **2.3 ROCIADO CON PLASMA**

Este método utiliza un gas formador de plasma, usualmente argón o nitrógeno, el cual realiza ambas funciones, proveer una fuente de calor y ser un agente propulsor de las partículas atomizadas.

Un arco de alto voltaje (arriba de 80 kW) es generado con una pistola especial, esta energía ioniza el gas, transformándolo en plasma. El gas excitado es forzado a través de una boquilla convergente-divergente y libera un calor extremo al volver a su estado natural en la salida de la boquilla. El material en polvo es inyectado en el plasma caliente a presión, en donde es fundido y proyectado a alta velocidad.



**Figura 16. Rociado con plasma. (Fuente: US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997).**

### **Características del recubrimiento rociado con Plasma:**

Son de mediana o baja porosidad. Presentan mejores propiedades mecánicas que los recubrimientos aplicados con flama (densidad, dureza, resistencia a la abrasión, entre otras). Los valores nominales de tensión de adherencia entre la capa y el sustrato están entre 5,500 a 9,500 psi.

## **2.4 ROCIADO CON HVOF (HIGH VELOCITY OXI FUEL) SPRAY**

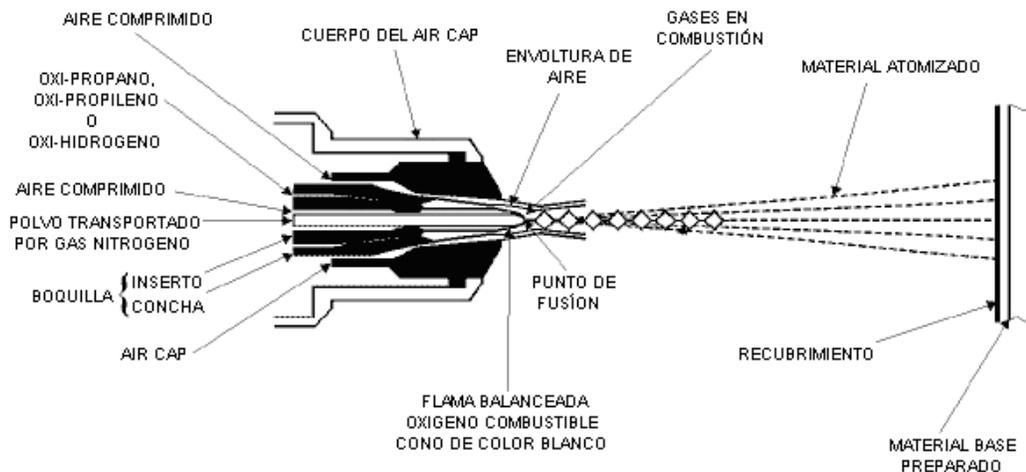
Utiliza eficientemente una alta energía cinética y un calor controlado para producir un recubrimiento denso, con muy baja porosidad y gran fuerza de adherencia. La pistola de HVOF consiste en una boquilla para mezclar los gases de combustión, una cámara de combustión refrigerada por aire y una boquilla externa (air cap).

El gas de proceso se introduce en una serie de aberturas anulares coaxiales. Un flujo central de polvos y gas transportador, está rodeado por aire, combustible, oxígeno y el restante aire de proceso. Esto centra la corriente del rocío y previene que el polvo entre en contacto con las paredes de la pistola.

El oxígeno y combustible se queman al entrar en la parte trasera de la cámara de combustión. La mayoría de aire del proceso es usado para enfriar la cámara de combustión. En el proceso, es precalentado antes de entrar en la boquilla externa o air cap.

En la boquilla externa, el aire de proceso, forma una delgada capa límite, que minimiza el contacto de la llama con las paredes ayuda a reducir la cantidad de calor transferido a ella.

Los gases calientes a una temperatura de combustión arriba de 3316 °C, salen a través de una tobera convergente con a una velocidad que puede alcanzar 1372 m/seg.



**Figura 17. Rociado con HVOF. (Fuente: US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997).**

### **Características de los recubrimientos rociados por HVOF:**

Son de muy baja a nula porosidad. Por este medio se consiguen las mejores capas para materiales de tipo metálico o carburos. Se observan los mejores resultados en cuanto a dureza, densidad, resistencia a la abrasión y adherencia. Los valores nominales de tensión de adherencia entre la capa y el sustrato están entre 8,000 a 12,500 psi.

### **3. PROPUESTA PARA EL REACONDICIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE COSTOS**

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL BASE**

Los álabes directrices están fabricados con acero inoxidable martensítico ASTM CA-6NM

**Tabla 1. Composición química del acero ASTM CA-6NM**

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu+W+V
0.06	1.0	1.0	11.5 - 14.0	0.4 - 1.0	3.5 - 4.5	0.03	0.04	0.50

#### **3.2 CHEQUEO DE MEDIDAS INICIALES**

Esto se realiza con plantillas proporcionadas por el fabricante de los álabes, con las cuales se determina el espesor del material que se ha perdido. En la bandera este espesor no es tan crítico, sin embargo, la superficie se torna rugosa y puede ser necesario el aporte de material y rectificado posterior, para proveer una superficie lisa que disminuya el efecto de cavitación. En la unión del eje y la bandera ocurre un desgaste un poco más profundo debido a que ahí se concentran líneas de corriente, que a su vez, transportan partículas abrasivas.

#### **3.3 PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO**

El proceso de reparación de los daños por cavitación y desgaste por erosión, será el recubrimiento por soldadura, debido a que produce superficies más durables. Hay que tomar en cuenta que la extensa reparación por soldadura puede introducir esfuerzos y deformaciones en el área reparada y puede dañar el componente.

### **3.4 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE**

Debido a la condición de la mayoría de las superficies con daños por cavitación, la reparación no puede hacerse directamente llenando las áreas socavadas. Las superficies socavadas usualmente deben ser desgastadas para remover las áreas dañadas y proveer una superficie que se pueda limpiar adecuadamente antes de ser llenada con soldadura.

La bandera de los álabes se limpiará con chorro de arena (sand blast), para lograr un acabado libre de partículas, óxidos y suciedad. La parte de la unión de la bandera con el eje de los álabes será preparada con disco de corte para eliminar las irregularidades antes de soldar.

### **3.5 PROCESO DE SOLDADURA**

Los procesos de soldadura más usados para la reparación de éste tipo de daños, son la soldadura de arco de metal con gas de protección (GMAW) y la soldadura de arco de metal con electrodo revestido (SMAW).

Se utilizará el proceso de soldadura GMAW, debido a que presenta las ventajas siguientes:

- a) Mayor velocidad de aplicación
- b) Menor cantidad de calor en la aplicación, lo que reduce el riesgo de distorsiones.
- c) Si se aplica correctamente, la calidad de la soldadura es mejor, sin incrustación de escoria ni excesos de soldadura.

Aunque se requiere un cuidado especial en la ventilación debido a que un movimiento excesivo de aire, puede dispersar el gas de protección, y poca ventilación provoca la acumulación del gas de protección en el área de trabajo, poniendo en peligro al personal. Se recomienda utilizar respiradores principalmente cuando se utiliza argón como gas de protección.

### 3.6 SELECCIÓN DEL MATERIALE DE APORTE

Los aceros inoxidables martensíticos tienen la característica de templar al aire, por lo que su soldabilidad en principio es muy limitada, existiendo una gran probabilidad de agrietamiento. En cada caso particular hay que estudiar la soldabilidad, que puede variar desde mala hasta buena, haciéndose necesario evaluar el precalentamiento y/o el tratamiento térmico post-soldadura.

Los materiales de aporte también deben ser estudiados con detalle, aunque es frecuente la utilización de aceros inoxidables austeníticos. Una técnica especial para la soldadura de estos aceros es el “buttering” o untado, que consiste en el recubrimiento previo, por depósito, de la pieza a unir con una capa de acero inoxidable austenítico y después se procede a soldar como si de un austenítico se tratase.

En áreas de bajo esfuerzo e, incluso, en áreas de alto esfuerzo en donde la profundidad del daño no exceda 10% del espesor total de la pieza, las reparaciones se realizarán con acero inoxidable austenítico de la serie 308.

En áreas de alto esfuerzo donde la profundidad del picado exceda 10% del espesor de la pieza, puede ser apropiado utilizar un acero martensítico 410 Ni-Mo, debido a su similitud en las propiedades físicas y químicas con el acero ASTM CA-6NM. Al soldar con este material se requiere precalentamiento para evitar la fisuración por hidrógeno y un tratamiento térmico post-soldadura.

El desgaste de la bandera del álabe (Figura 18), no es muy profundo, y se reparará utilizando microalambre de acero inoxidable austenítico AWS ER 308L.



**Figura 18. Desgaste en la bandera del álabo (Fuente: Fotografía tomada en álabo directriz de la Central Hidroeléctrica los Esclavos).**

**Tabla 2. Composición química del electrodo AWS ER 308L**

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
0.022	1.88	0.45	0.016	0.012	10.4	20.2

El desgaste en la unión del eje con la bandera (Figura 19 y 20), se reparará con microalambre de acero inoxidable Martensítico AWS ER 410 Ni-Mo pues ahí existe mayor esfuerzo y el desgaste es más profundo.



**Figura 19. Desgaste en la unión de la bandera con el eje inferior del álabe. (Fuente: Fotografía tomada en álabe directriz de la Central Hidroeléctrica los Esclavos).**



**Figura 20. Desgaste en la unión de la bandera con el eje superior del álabe. (Fuente: Fotografía tomada en álabe directriz de la Central Hidroeléctrica los Esclavos).**

**Tabla 3. Composición química del electrodo AWS ER 410 Ni-Mo**

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu
0,02	0,43	0,38	12,33	0,5	4,5	0,007	0,015	0,16

### 3.7 PARAMETROS DE SOLDADURA

En ciertas circunstancias, el precalentamiento es recomendado como una buena práctica en el proceso de soldadura, el propósito es prevenir la fisuración por hidrógeno.

El precalentamiento, depende de la composición química, espesor, resistencia y rigidez del material base, calor suministrado por el proceso de soldadura y material de aporte.

Para soldar los aceros martensíticos es necesario el precalentamiento. La ficha técnica del acero ASTM CA-6NM, confirma se requiere un precalentamiento de la pieza de 100°C a 150°C

En la tabla 4, se observan los parámetros de soldadura para el microalambre de acero austenítico AWS ER 308L.

**Tabla 4. Parámetros de soldadura para el microalambre AWS ER 308L**

	<b>AWS ER 308L (0.9mm)</b>											
	Transferencia Corto Circuito						Transferencia Arco Spray					
Vel. De alambre (Pulg/Min)	110	150	180	240	280	320	360	400	430	450	480	500
Amperaje	60	90	110	120	130	140	160	170	180	200	210	220
Voltaje	15	16	17	18	18	19	21	22	23	24	25	26
Flujo (pie <sup>3</sup> /h)	30	30	30	30	30	30	35	35	35	40	40	40

	<b>AWS ER 308L (1.1mm)</b>											
	Transferencia Corto Circuito						Transferencia Arco Spray					
Vel. De alambre (Pulg/Min)	120	150	170	200	220	250	280	310	330	350	380	400
Amperaje	100	140	150	160	180	190	200	210	220	240	260	280
Voltaje	16	17	18	19	20	20	22	23	24	25	26	27
Flujo (pie <sup>3</sup> /h)	30	30	35	35	35	35	40	40	40	40	40	40

**Tabla 5. Parámetros de soldadura para el microalambre AWS ER 410 Ni-Mo**

Diámetro (mm)	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Gas (l / min)	Presentación según DIN 8559
1,0	80 - 200	22 – 27	12	Carrete de 15kg
1,2	100 - 250	26 – 30	12	Carrete de 15kg
1,6	190 -360	30 – 34	15	Carrete de 15kg aprox. (peso variable)

Con base en la ficha técnica del electrodo AWS ER 410 Ni-Mo, se cuidará que el calor de entrada (heat input) en el proceso de soldadura no exceda de 1.5 kJ/mm.

Para ello utilizaremos la siguiente formula:

$$Q = \left( \frac{V \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \eta$$

Donde:

Q = Calor de entrada [kJ/mm];

V = Voltaje [V]; (se toma de la tabla 5)

I = Corriente [A], (se toma de la tabla 5) y

S = Velocidad de avance de la soldadura [mm/min].

$\eta$  = Rendimiento (0.75 para SMAW; 0.9 para GMAW; 0.8 Para TIG).

El gas de protección recomendado por el fabricante del electrodo es Argón + 2% de CO<sub>2</sub>, preferiblemente, pero también se puede utilizar Argón + 2% de O<sub>2</sub>.

### 3.8 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS SUPERFICIES REPARADAS POR SOLDADURA

El cordón de soldadura es una mezcla entre el metal aportado y el metal base fundido, por lo que la composición final del cordón estará en función de esta mezcla. El porcentaje de metal base fundido con respecto al metal aportado en la soldadura se denomina coeficiente de dilución.

La composición química de una soldadura está dada por la siguiente fórmula:

$$C_x = C_a \frac{D \cdot (C_b - C_a)}{100}$$

Donde:

C<sub>x</sub> = Porcentaje del elemento “x” en el cordón de soldadura

C<sub>a</sub> = Porcentaje del elemento “x” en el metal de aporte

C<sub>b</sub> = Porcentaje del elemento “x” en el metal base

D = Coeficiente de dilución

El grado de dilución depende de:

El proceso de soldadura empleado

Del diseño de junta y del número de pasadas.

El coeficiente de dilución para el proceso de Soldadura MIG, está entre 25% y 50% cuando se suelda con arco Spray y entre 15% y 30% cuando se suelda arco corto. Suele ser mayor en donde se producen zonas de contacto amplias entre el metal base y el aportado.

**Tabla 6. Composición química final en la bandera del álabe.**

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu
Material Base CA-6NM	0.060	1.000	1.000	12.750	0.700	4.000	0.030	0.040	0.500
Material de aporte 308L	0.022	0.450	1.880	20.200	0.000	10.400	0.012	0.016	0.000
<b>Material resultante (40% de dilución)</b>	<b>0.037</b>	<b>0.670</b>	<b>1.528</b>	<b>17.220</b>	<b>0.280</b>	<b>7.840</b>	<b>0.019</b>	<b>0.026</b>	<b>0.200</b>

Tabla 7. Composición química final en unión de la bandera con el eje del álabe.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu
Material Base CA-6NM	0.060	1.000	1.000	12.750	0.700	4.000	0.030	0.040	0.500
Material de aporte 410 Ni-Mo	0.020	0.430	0.380	12.330	0.500	4.500	0.007	0.015	0.160
<b>Material resultante (40% de dilución)</b>	<b>0.036</b>	<b>0.658</b>	<b>0.628</b>	<b>12.498</b>	<b>0.580</b>	<b>4.300</b>	<b>0.016</b>	<b>0.025</b>	<b>0.296</b>

Tabla 8. Niquel y Cromo equivalente de los metales resultantes luego de la reparación.

	Ni <sub>eq</sub>	Cr <sub>eq</sub>
ACERO CA-6NM	6.300	13.450
ACERO ASTM 308L	12.000	20.200
ALEACION RESULTANTE SOBRE LA BANDERA	9.720	17.500
ACERO ASTM 410 Ni-Mo	5.290	12.830
ALEACIÓN RESULTANTE EN UNION DEL EJE Y BANDERA	5.694	13.078

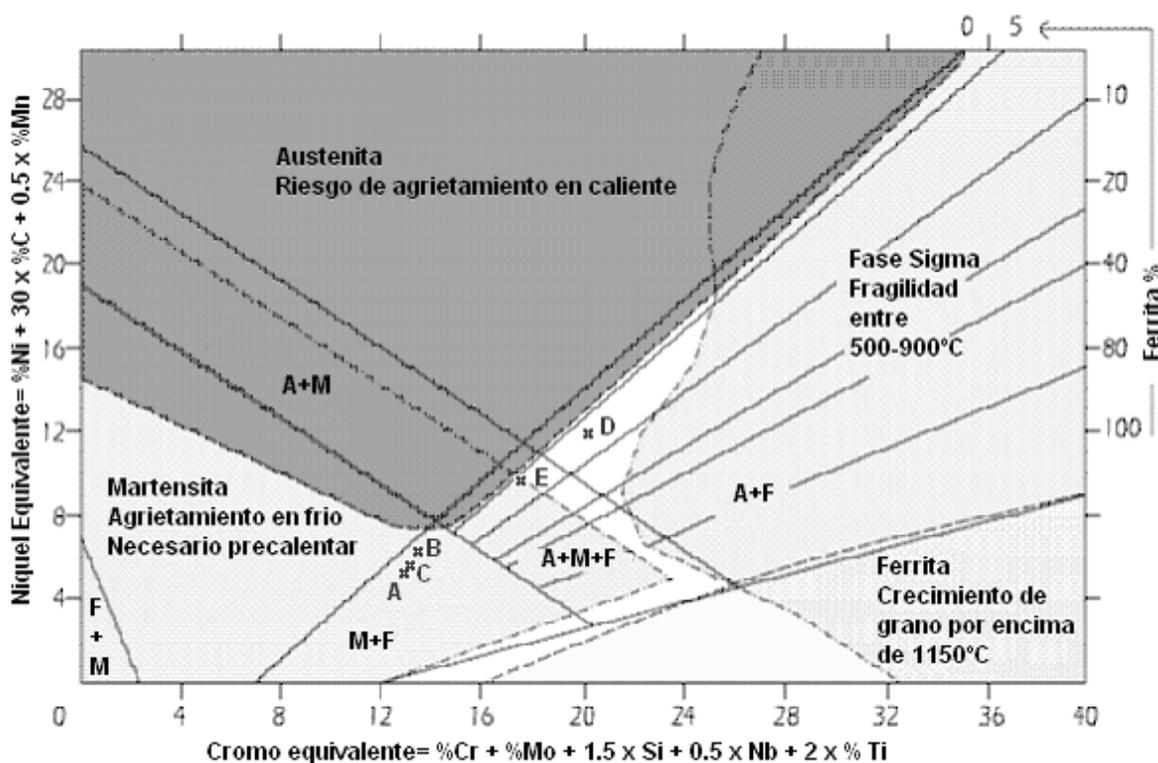


Figura 21. Diagrama de Schaeffler,

A: Acero ASTM 410 Ni-Mo; B: Material base, acero CA-6NM; C: Aleación resultante en la unión del eje y la bandera; D: Acero ASTM 308L; E: Aleación resultante sobre la bandera.

### **3.9 TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA**

Se hará un revenido para reducir la fragilidad del material después de la soldadura.

De acuerdo a la norma ASTM A743/a 743M, sobre tratamientos térmicos requeridos para el acero grado CA-6NM, se debe calentar la pieza con un gradiente de 50 °C/hora, hasta alcanzar una temperatura de 610 °C, mantener la pieza a esta temperatura durante 45 minutos (30 minutos por cada pulgada de espesor), y posteriormente enfriar dentro del horno a razón de 40 °C/hora.

### **3.10 ACABADOS FINALES**

Posterior a la reparación y el tratamiento térmico, se procederá al maquinado y pulido de las piezas para alcanzar medidas originales, comparando contra plantillas y verificando también las medidas especificadas en planos.

Luego de la reconstrucción se espera que el alabe luzca como uno nuevo (Figura 22).



**Figura 22. Álabo nuevo (Fuente: Fotografía tomada en álabo directriz de la Central Hidroeléctrica los Esclavos)..**

### **3.11 RECUBRIMIENTO TERMORROCIADO RESISTENTE A LA CAVITACIÓN Y EROSIÓN**

De acuerdo al reporte técnico 97/1997 de los laboratorios de investigación de ingeniería de la construcción del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, sobre "Desarrollo de recubrimientos termorrociados resistentes a la cavitación y erosión", realizado por la División de Ciencia y Tecnología de materiales, con colaboración del Laboratorio de Termorrociado de la Universidad Estatal de Nueva York, se identificó y desarrolló un material y un proceso de aplicación para un recubrimiento termorrociado, capaz de proteger las partes de turbinas y bombas hidráulicas, del daño provocado por la erosión, la cavitación resultante de la erosión y la corrosión galvánica.

Luego de una extensa investigación y pruebas de laboratorio, se determinó que los recubrimientos aplicados por el método HVOF, tienen una menor tasa de desgaste por cavitación que los aplicados con plasma y cualquier otro método de termorrociado.

En pruebas realizadas a 21 tipos distintos de recubrimientos, el recubrimiento de Stellite® 6, aplicado por el método HVOF, demostró tener la menor tasa de desgaste por cavitación, 11.7 mg/h. Aunque, es aún mayor que la del acero inoxidable 308 aplicado por soldadura, el cual tiene una tasa de desgaste por cavitación de 3.2 mg/h.

**Tabla 9. Composición química del Stellite® 6**

Co	Cr	Mo	Ni	Fe	Si	W
57.9	28	3	3	3	1.1	4

En pruebas de laboratorio, también se observó que el volumen perdido por erosión en los recubrimientos de Stellite® 6, aplicados por HVOF, fue 5.33 mm<sup>3</sup>/h. En las mismas condiciones de prueba, el acero inoxidable 308, tuvo una pérdida de 9.22 mm<sup>3</sup>/h.

El recubrimiento de Stellite® 6 aplicado por el método HVOF, demostró tener aplicación en bombas y turbinas hidráulicas, sobre superficies de acero al carbón y superficies de acero inoxidable.

De cualquier modo, a pesar que la resistencia a la cavitación de un recubrimiento de Stellite® 6 aplicado por HVOF es 4 veces menor que la del acero 308, están claras las ventajas de usar recubrimientos de Stellite® 6 aplicados con HVOF, pues su resistencia a la erosión es 73% mayor que la del acero 308 aplicado por soldadura, y la resistencia al desgaste es mayor que la del acero 304. Esto conduce a pensar que los resultados de este recubrimiento serán satisfactorios, considerando que la cavitación típicamente no ocurre en forma aislada, sino usualmente se asocia con la erosión y corrosión.

Se realizará un recubrimiento de Stellite®6 de 20 milésimas de pulgada aplicado por el método HVOF sobre las banderas de los álabes.

### **3.12 ANÁLISIS DE COSTOS**

#### **3.12.1 REACONDICIONAMIENTO DE LOS ÁLABES DIRECTRICES**

Las áreas de daño por cavitación media y severa, requieren la eliminación del material dañado y una posterior reparación por soldadura con acero inoxidable, tratamiento térmico y maquinado posterior. El costo total de la reparación utilizando soldadura es de USD 1,000 por pie cuadrado, incluyendo el costo de los materiales y la mano de obra calificada, se estima que la reparación total del juego de 18 álabes directrices, cada uno con una superficie aproximada de 1.2 pies cuadrados, tendría un costo de USD 21,600.

Un recubrimiento de 20 milésimas de pulgada de Stellite® 6, aplicado con el método HVOF, tiene un costo aproximado de USD350 por pie cuadrado, incluyendo la preparación de la superficie. El costo total de este recubrimiento sobre los 18 álabes directrices se estima en USD 7,560.

Sosteniendo una apropiada programación del mantenimiento, podrían hacerse futuras reparaciones en el área únicamente rociando recubrimientos por el método HVOF, a un costo de USD 350 por pie cuadrado, en lugar de realizar reparaciones por soldadura a un costo mayor.

El uso de un recubrimiento de sacrificio de Stellite® 6, eliminaría también el daño potencial en el sustrato, causado por los considerables esfuerzos residuales asociados con las repetidas reparaciones por soldadura.

El costo total del reacondicionamiento, incluyendo la reparación por soldadura y el recubrimiento de Stellite® 6, es de USD 29,160.

### **3.12.2 REEMPLAZO DE LOS ÁLABES DAÑADOS POR ÁLABES NUEVOS**

El costo de un juego nuevo de álabes es de 180 mil dólares, incluyendo los gastos de importación.

El costo de oportunidad por paro de maquinaria, será el mismo si se instalan álabes nuevos o si se reacondicionan los viejos, pues se propone, que se haga el cambio por álabes nuevos y el reacondicionamiento de los álabes dañados se realice mientras los nuevos están en servicio. De esta manera se contará con un juego de álabes reacondicionados en stock, para poder cambiarlos en el siguiente mantenimiento programado.

El costo de montaje de los alabes será el mismo, sin importar si son nuevos o reacondicionados.

El tiempo de servicio se espera que sea el mismo para los alabes nuevos y los reacondicionados.

## CONCLUSIONES

1. El desgaste en la bandera del álabe, se reparará utilizando soldadura tipo MIG y acero inoxidable austenítico AWS ER 308L.
2. El desgaste en la unión del eje con la bandera, se reparará utilizando soldadura tipo MIG y acero inoxidable martensítico AWS ER 410 Ni-Mo.
3. Después de las reparaciones por soldadura se realizará un tratamiento térmico de revenido conforme a la norma ASTM 743 y luego se procederá al maquinado y pulido de las piezas para lograr las medidas originales.
4. Al terminar todas las reparaciones necesarias, es decir, soldaduras, tratamientos térmicos y maquinado de las piezas, se aplicará un recubrimiento de 20 milésimas de pulgada de Stellite® 6 por el método HVOF.
5. El costo del reacondicionamiento del cada juego de álabes directrices es de USD 29,160.00, mientras que el costo de adquisición de un juego de álabes nuevo es de USD 180,000.00, obteniendo así, un ahorro de USD 150,840.00 por cada juego de álabes
6. El reacondicionamiento se realizará a los álabes que se han desmontado en el último mantenimiento, de manera que cuando sea necesario un paro de maquinaria, se cuente con un juego de álabes en buen estado y solamente se proceda a realizar el cambio como si se tratara de un juego de álabes nuevo.
7. Se espera que el tiempo de servicio de los álabes reacondicionados sea el mismo que el de los álabes nuevos.

## RECOMENDACIONES

1. El trabajo de reacondicionamiento se debe realizar por contratistas especializados en procesos de soldadura y tratamientos térmicos, pues el INDE no cuenta con un taller adecuado ni personal especializado en este tipo de trabajos.
2. Realizar inspecciones constantes a los álabes reacondicionados por lo menos una vez a año para evaluar su condición.
3. Dependiendo de los resultados del reacondicionamiento, evaluar la posibilidad de reacondicionar otras piezas como el rodete de la turbina, el cual está hecho del mismo material.
4. Evaluar el desempeño del recubrimiento de Stellite® 6 sobre los álabes directrices para determinar si es necesario, o se puede obviar en los próximos reacondicionamientos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Murray García, Harry Ernesto. Controles de calidad en la fabricación de un Rodete Pelton. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Físicas. EAP de Ingeniería Mecánica de Fluidos. Lima, 2005.
2. AWS Committee on Thermal Spray. Thermal Spraying: Practice, Theory and Application. American Welding Society, Miami, FL, 1995.
3. Jeffrey H. Boy, Ashok Kumar, Patrick March, Paul Willis, and Herbert Herman. Cavitation- and Erosion-Resistant Thermal Spray Coatings. US Army Corps of Engineering Research Laboratories Technical Report 97/118. July 1997.
4. Facilities Engineering Branch Engineering Division Denver Office Denver, Colorado. Turbine Repair, Facilities Instructions, Standards, & Techniques Volume 2-5. september 2000.
5. Pedro Ayuso, Jorge-Mauro de. Detección de cavitación en turbinas Francis. Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, departamento de Mecánica de Fluidos, 2004.

## ANEXOS

Ficha técnica del microalambre de acero inoxidable Inoxidable martensítico AWS ER 410 Ni-Mo	39
Ficha técnica del microalambre de acero inoxidable	40

# INOXFIL PS 134

## Alambre para proceso MIG

### Descripción

Alambre macizo de Acero Inoxidable Martensítico para soldadura de unión y relleno por proceso MIG.

### Norma Técnica

AWS A5.9 – ASME II/C	DIN 8556	UNS Number
ER 410 Ni-Mo	SG X2 Cr Ni 13 4	S41086

### Análisis químico del metal depositado

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P	Cu
0,02	0,43	0,38	12,33	0,5	4,5	0,007	0,015	0,16

### Características:

- El INOXFIL PS 134 deposita un metal que tiene buena resistencia a la corrosión por agua, vapor y aire marino. Así mismo presenta excelentes resistencia a la erosión, cavitación y altas temperaturas.
- Sus excelentes valores de impacto garantizan un depósito de soldadura de alta calidad.

### Parámetros de Soldadura:

Diámetro (mm)	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Gas (l / min)	Presentación según DIN 8559
1,0	80 - 200	22 – 27	12	Carrete de 15kg
1,2	100 - 250	26 – 30	12	Carrete de 15kg
1,6	190 -360	30 – 34	15	Carrete de 15kg aprox. (peso variable)

### Propiedades Mecánicas del Metal Depositado:

Límite Fluencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Dureza Brinell (HB)	Energía Impacto a +20°C Charpy V (J)	Elongación en 2"
600 - 780	840-1100	300-350	≥ 75	15-21%

### Pre calentamiento y Tratamiento Térmico:

- Pre calentamiento 150°C y temperaturas de interfase en caso de piezas gruesas 150 a 175°C. Máximo calor de entrada (heat input), 15 000 J/cm.
- Tratamiento térmico 580-620°C durante 8 horas.

### Aplicaciones:

- El INOXFIL PS 13/4 es un alambre de acero inoxidable para ser usado con el proceso MIG en la unión y/o recubrimiento de aceros inoxidables martensíticos del tipo AISI 410Ni-Mo, DIN X5 CrNi 13 4, G – X CrNi13 4, G – X5 CrNi 13 6.
- Aceros inoxidables ASTM CA 6 NM.
- Aceros inoxidables DIN: X5 CrNi 13 4, G – X5 Cr Ni 13 4, G- X5 Cr Ni 13 6.
- Aceros inoxidables martensíticos, ferríticos, laminados, forjados o fundidos.
- Rodetes Pelton, turbinas a vapor, sistemas de generación de vapor, bombas, válvulas agujas, asientos, toberas, escudos, rodillos guía de palanquilla, etc.

### Gases recomendados:

- Ar + 2% de CO<sub>2</sub> (preferible) ó Ar + 2% de O<sub>2</sub>.

**ALLOY DATA SHEET**  
**CA6NM**

**CORROSION RESISTANT ALLOY**

REVISION: 09/96

**DESCRIPTION**

CA-6NM is a hardenable Fe-Cr-Ni-Mo alloy based on the 13% chromium stainless steel alloy CA-15. Ductility, impact properties and resistance to salt water corrosion are raised by the addition of nickel and molybdenum. Castability in thick or intricate sections is better than that of the 13% chromium alloy. Similarly the alloy is more readily welded and requires lower preheat temperatures. The alloy is most generally used in the normalized and tempered condition, but variations in heat treatment are used to enhance specific properties.

**COMPOSITION**

	<u>C</u>	<u>Mn</u>	<u>Si</u>	<u>Cr</u>	<u>Ni</u>	<u>Mo</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cu+W+V</u>
Min %				11.5	3.5	0.4			
Max %	0.06	1.0	1.0	14.0	4.5	1.0	0.04	0.03	0.50

**APPLICATIONS**

Pump casings, bowls, impellers and diffusers, valve bodies, water turbine components, ships propellers, concast rolls

**PRODUCT FORMS**

Horizontal and vertical centrifugal castings; static castings.

**PHYSICAL PROPERTIES**

Density (lbs/in <sup>3</sup> )	0.278
Liquidus(°F)	2715
Solidus(°F)	2670
Thermal Conductivity (Btu/h/ft <sup>2</sup> /ft/°F)	14.5 @ 212°F 16.7 @ 1000°F
Thermal Expansion (10 <sup>-6</sup> in/in °F)	6.0 @ 70-212°F 7.0 @ 70-1000°F
Magnetic Permeability	Ferromagnetic

**MECHANICAL PROPERTIES (Typical Values -1950°F Air Cool. Tempered 1100-1150°F)**

		<u>-200</u>	<u>-100</u>	<u>70</u>	<u>400</u>	<u>600</u>	<u>800</u>	<u>1000°F</u>
U.T.S.	K.S.I.			118	104	102	90	68
Y.S.	K.S.I.			98	92	82	78	65
Elong.	%			20	18	17	16	24
R.A.	%			60	58	57	54	70
Charpy "V"	ft-lbs	30	50	58				

**HARDNESS**

CA-6NM hardness can be controlled through the amount of carbon used in the material and the type of heat treatment, however ductility and toughness can suffer when hardness is increased.

Carbon (%)	Max. Hardness (BHN)	
0.02	315	
0.03	327	
0.04	338	
0.05	351	
0.06	362	- standard CA-6NM carbon content
0.07	374	
0.08	387	
0.09	400	
0.10	414	
0.11	428	
0.12	443	
0.13	460	
0.14	477	
0.15	496	

**WELDABILITY**

CA-6NM may be welded by the SMAW or GTAW processes.

Electrodes Same composition.

Preheat 212 to 300°F

Post weld heat treatment 1100 to 1150°F.

Procedures for welding CA6-NM alloy are available from Kubota Metal Corporation.

**CREEP-RUPTURE PROPERTIES**

Long term creep-rupture properties were extrapolated from Larson-Miller Parameter versus stress plots

<u>HOURS</u>		<u>RUPTURE-STRESS-KSI</u>			°F
		<u>800</u>	<u>900</u>	<u>1000</u>	
100.	AVG.	-	52	28	
	MIN.	-	47.5	26	
1,000.	AVG.	>50	37	20	
	MIN.	>50	35	18	
10,000.	AVG.	54	28	14	
	MIN.	50	25	13	
100,000	AVG.	41	20	(10)	
	MIN.	37	18.5		

Note: Creep-rupture stresses are subject to periodic revisions as the results from long term tests become available.

**RELATED SPECIFICATIONS**

ASTM: A352(CA6NM), A 487(CA6NM); A743(CA-6NM), A757(E3N), UNS J91540

Nearest wrought grade: None

HEAD OFFICE, FOUNDRY & INTERNATIONAL SALES  
 Kubota Metal Corporation, Fahramet Division  
 25 Commerce Road, P.O. Box 1700,  
 Orillia, Ontario, Canada, L3V 6L6.  
 Phone (705) 325-2781  
 Fax (705) 325 5887