



**Universidad Nacional de Lomas de Zamora**  
INVESTIGACIONES

**FORTALECIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE PROYECTOS  
DE INVESTIGACIÓN**

**INFORME FINAL**

**Denominación del proyecto:**

*Microturbinas Hidráulicas CFT – Caracterización*

**Director del Proyecto:**

*Ing. Jorge Gilli*

**Equipo de investigación:**

*Ing. Fernando Massaro – Ing. Marcelo Pagnola*

**Facultad:**

*Ingeniería*



# CAPITULO I

## Resumen

---

El primer objetivo del proyecto de investigación quedó concluido tal como se explicó en el Informe de avance parcial (Noviembre de 1998), sumando como logro su publicación dentro del Programa Hidrológico Internacional de UNESCO. Para el segundo objetivo entendemos que, por el alcance de los programas FEPI, quedó también cumplimentado. Aunque el tema en sí, durante la investigación, multiplicó sus posibilidades de exploración en forma exponencial.

Hasta hoy hemos obtenido resultados más que alentadores en la formulación de un nuevo modelo físico para el diseño de inyectores CFT de alta eficiencia. Esta es la base del nuevo Soft ALABE 1.1 con el que se logra una simulación del comportamiento hidráulico, optimización del diseño y asistencia en la manufactura con técnicas CAD-CAM. Aunque por ahora esta versión es incompleta y sólo permite obtener la tobera superior, creemos que es el camino a seguir para llegar a una aplicación industrial directa. Por otra parte el Soft permitió abrir una etapa exploratoria en investigación a partir del hallazgo de las Cartas de Optimización del diseño de inyectores CFT.

Haber logrado un instrumento de trabajo que tenga tanta potencia y versatilidad como el Soft ALABE 1.1, utilizable en investigación aplicada y en el entorno industrial en forma simultánea, superó cualquier objetivo imaginable previamente.



## CAPITULO II

# Introducción

---

### **1- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA:**

#### **INTRODUCCIÓN:**

Hasta el momento la determinación del momento generado durante la acción de control de los servoreguladores de potencia de las microturbinas hidráulicas CFT (Cross Flow Turbine) era determinado experimentalmente con ayuda de bases técnicas empíricas. Para poder diseñar con éxito servoreguladores en máquinas de potencias mayores por este camino sería a largo plazo muy lento y costoso. El correcto funcionamiento de dicho componente sencillamente es fundamental para poder construir microcentrales hidroeléctricas capaces de funcionar en forma autónoma de la Red Interconectada del servicio eléctrico.

Antes, y para lograr lo mencionado, se debe caracterizar el comportamiento de los inyectores y su diseño como un elemento "fijo" de la máquina. Luego adicionándole el movimiento de rotación obtenemos en la práctica el llamado "servoregulador" de potencia.

#### **EL PROBLEMA:**

No podemos controlar lo que no conocemos. Por ello, lo que nos ocupa en este proyecto, es una actividad original de Investigación Aplicada, consistente en la caracterización del diseño y comportamiento de los inyectores de las microturbinas CFT.

### **2- ANTECEDENTES:**

Los antecedentes principales consisten en los estudios realizados en el Laboratorio de Microturbinas Hidráulicas del Instituto Balseiro, donde se están realizando los desarrollos de punta a nivel mundial. Nuestro grupo colabora con el citado laboratorio desde el año 1997.

### **3- JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO:**

En lo formal cualquier actividad de Investigación originada en una cátedra es sustancialmente beneficiosa tanto para los investigadores como para los alumnos que en el futuro sean receptores de conocimientos con otro nivel de fundamento. A su vez se transmiten experiencias y vivencias fundamentales, en este caso, para las ingenierías de



alto nivel.

Obtener un grado de desarrollo técnico nacional de punta en un tema útil para nuestra región como lo es la electrificación rural justifica cualquier aliento al mismo, ya que el beneficio es extensivo e inmediato.

#### **4 OBJETIVOS (REFORMULADOS):**

- a- Caracterización del comportamiento de los álabes reguladores CFT, basados en sectores de arco de círculo a partir de toberas de sección rectangular.
- b- Obtener un modelo matemático para el diseño de álabes reguladores de alta eficiencia ( a complementar en el futuro con coeficientes de ajuste experimentales, obtenibles en el Banco de Pruebas Experimentales)
- c- Diseñar un Banco de Pruebas Experimentales en donde las variables Caudal y Presión sean independientes y controlables a voluntad y cuya dinámica (estados transitorios hidráulicos) simule el comportamiento de un salto de agua real.

##### **a) Grado de cumplimiento:**

Los objetivos están listados en orden inverso, es decir para lograr el objetivo a- primero hay que cumplir el b- , y para cumplir éste a su vez primero el c-. Entendemos que el objetivo c- quedó cumplido y plasmado en el Reporte Técnico N° 1, recientemente publicado en Internet por Naciones Unidas (PHI-UNESCO). El objetivo b- también quedó cumplimentado en un paper previo llamado Soft ALABE v1.0, publicado en el anuario de trabajos de la UNLZ. Luego se ampliaron en el Reporte Técnico N° 2: Soft ALABE v1.1.

##### **b) Razones:**

Realizamos dentro de la Investigación Aplicada un trabajo desde la base entendemos muy sólido. Primero diseñamos nuestros propios instrumentos y métodos de medición para experimentar luego en ellos sobre nuestros propios modelos físicos. Pasar del empirismo técnico, muy válido para empezar, a una base teórica firme no se logra de un día al otro. Por ello nunca se escatimó ningún esfuerzo en profundizar y perfeccionar un trabajo que al fin y al cabo suma a lo realizado en otros centros de investigación, haciendo realidad la visión de la ciencia como un emprendimiento colectivo. Queda una puerta abierta a quienes deseen completar el objetivo planteado en a-, pero lo que es más interesante es que esa puerta ahora conduce a muchos nuevos objetivos. El Soft ALABE v1.1 ha permitido abrir un nuevo camino exploratorio.

#### **5- HIPÓTESIS (REFORMULADA):**

- a- Los álabes reguladores basados en sectores de arco de círculo presentan características inherentes de flujo lineales.
- b- Los álabes reguladores se deben asimilar como toberas dobles de sección



rectangular con ángulo de convergencia variable según ley a determinar y ángulos óptimos al menos menores a  $10^\circ$  a partir de la conversión del último 40% de energía potencial en cinética. Todo ello para obtener rendimientos hidráulicos en la conversión energética de al menos el 95%.

- c- Existe transferencia de masa y pérdidas de energía asociadas a las salidas de las toberas de diseño actual.
- d- La incorporación de un deflector biplanar fijo integrado al álabe regulador en la posición de máxima apertura atenuará este fenómeno a la vez que actuará como orientador de flujo en posiciones intermedias, obteniéndose una curva característica más plana.



## CAPITULO III

# Materiales y Métodos

### 1- UNIDADES DE ANÁLISIS:

Contexto: Microturbina Hidráulica CFT.

Unidad de análisis macro: Alabe regulador.

Unidades de análisis: Sistema de Toberas

Deflector biplanar fijo.

Sistema de cierre y control de flujo basado en sectores de arco de círculo.

Soft ALABE v1.1

Unidad de análisis macro: Sistema de toberas

Unidades de análisis: Tobera superior

Tobera inferior

Borde de ataque

UNIDAD DE ANÁLISIS	VARIABLES PRINCIPALES	INDICADORES Y DIMENSIONES
Tobera Superior	Geometría: Ley de variación del ángulo de convergencia.	Angulo inicial ( °) Exponente de la función (adim.)
	Posición en la acción de control	Constante. Máx. apertura
	Fuerza resultante	Newton. + o -.
	Factor de rugosidad	Constante. Chapa comercial
	Coefficiente de descarga	Constante. Igual a 1.
	Fluido	Constante. Agua limpia 20°C.
	Rendimiento Hidráulico	0 a 100%.

### 2- SELECCIÓN DE LA MUESTRA:

NOTA: Tanto para este apartado como para los siguientes, aquello vinculado al diseño del Banco de Pruebas Experimentales ya fue desarrollado en el Informe de avance parcial (Noviembre de 1998).



Respecto al diseño del algoritmo, en sí es una creación original por lo que no seleccionamos "una muestra". Respecto de la unidad de análisis tampoco corresponde el concepto de muestreo. Esto sería aplicable recién en una hipotética etapa de pruebas de Laboratorio.

### **3- DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:**

- a- Diseño del algoritmo utilizando las más modernas herramientas de la Mecánica de Fluidos actual.
- b- Diseño del algoritmo de iteración.
- c- Diseño de los Códigos de Máquina (lenguaje computacional).
- d- Refinamiento de los Códigos de Máquina.
- e- Pruebas de los Códigos de máquina con verificación manual.
- f- Diseño del Administrador del Soft y entorno Windows. Enlaces con Software específico de graficación y manufactura por Control Numérico Computarizado.
- g- Construcción de un prototipo para verificación del funcionamiento del Soft.
- h- Generación de resultados utilizando el Soft.

### **4- DISEÑO DE INSTRUMENTOS Y/O ESTRATEGIAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN:**

El diseño del Banco de Pruebas Experimentales constituye el principal instrumento para recolección de información experimental. Por su parte, durante el desarrollo del proyecto, el Soft ALABE 1.1 se transformó en una poderosa herramienta para generar información simulada teóricamente. Ambos "productos" del proyecto de investigación se han transformado a la vez en generadores de información e instrumentos de corroboración.

En cuanto a la recolección de la información generada con el Soft ALABE 1.1, por tratarse de una etapa exploratoria, se tabuló manualmente hasta encontrar indicadores de interés. Cabe aclarar que hasta ahora los resultados generados por el Soft ALABE 1.1 representan un infinitésimo de todo su potencial, ya que insistimos abrió una etapa exploratoria, fuera de toda previsibilidad dentro del proyecto.

### **5- CIRCUNSTANCIAS QUE HAYAN INFLUIDO SOBRE LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN:**

No se identificaron tales circunstancias.

### **6- MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA:**

Se utilizó una tabulación cruzando variables manualmente hasta encontrar indicadores de interés. Seguramente esto podrá llevar a generar un segundo Soft, o una



versión más completa del ALABE 1.1, para tabulación automática, se descartó en este proyecto para poder seguir avanzando con los enlaces de manufactura CNC.

## **7- PROBLEMAS PRESENTADOS EN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO Y DISCUSIÓN DE LAS MODIFICACIONES INTRODUCIDAS:**

En la segunda etapa el problema básico consistió en no poder aplicar teoría aeronáutica al diseño del álabe regulador. Esto nos llevó a reformular la estrategia para el diseño del algoritmo, que derivó además en un cambio de "nombre" para el álabe regulador, siendo ahora llamado Inyector CFT . Esto es un cambio muy grande, pues dejamos de considerar un "álabe" y comenzamos a estudiar una "tobera".

Un problema secundario consistió en no disponer de Laboratorio para obtener los componentes experimentales que inevitablemente forman parte de la Mecánica de los Fluídos. Creemos que sobrepasamos este obstáculo elegantemente al introducir adaptaciones de trabajos hechos por otros investigadores y laboratorios, que si bien no son específicos, tienen un margen de error muy aceptable.



## CAPITULO IV

# Resultados

---

### **1- INFORMACIÓN OBTENIDA:**

Básicamente consiste en la obtención de las primeras Cartas de Optimización de Diseño para Inyectores CFT. Las mismas están incluídas como anexo en el Reporte Técnico N° 2: Soft ALABE v1.1.

### **2- PRODUCTOS OBTENIDOS:**

- a- Reporte Técnico N° 1: Banco de Pruebas Experimentales-Propuesta de Diseño. Publicación Internet 1999. Programa Hidrológico Internacional UNESCO.
- b- Soft ALABE v1.0. Publicación 1999. Anuario de Trabajos de Investigación UNLZ.
- c- Soft ALABE v1.1.
- d- Reporte Técnico N° 2: Soft ALABE 1.1.
- e- Cartas de Optimización de Diseño para Inyectores CFT.

### **3- TRANSFERENCIA AL ÁMBITO ACADÉMICO:**

Proyecto experimental desarrollado de una Microturbina Hidráulica tipo Schwankrug con modificaciones, dentro de la cátedra Proyecto de Máquinas.

Por otra parte el desarrollo del proyecto ha posibilitado a los Docentes-Investigadores transmitir conocimientos tradicionales en la Cátedra con un mayor sustento científico, elevando el nivel del curso.

### **4- FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS:**

Coincidentemente, y en forma especial, los ejecutores del proyecto han tenido oportunidad de desarrollar su potencial. Esto se ha reflejado en el nivel de los cursos internamente y puertas afuera con la publicación internacional del PHI-UNESCO (Reporte Técnico N° 1).

### **5- TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA:**

La aplicabilidad de los resultados es directa a nivel investigación aplicada. La continuación de estos trabajos podrá ser hecha por otros investigadores que deseen



retomarlos. Por otro lado a nivel aplicación industrial, si bien la versión 1.1 es "incompleta" tiene todos los elementos necesarios para ser utilizada en forma confiable y muy velozmente.



## CAPITULO V

### Discusión

#### **1- EXPLICACIÓN DEL SENTIDO DE RESULTADOS Y TENDENCIAS:**

La clave entendemos que está en las funciones que adoptamos para las variables, citadas como ecuaciones (3), (4) y (5) en el Reporte Técnico N° 2. A partir de aquí las posibles geometrías son prácticamente infinitas. Deben regir por ello los criterios de optimación. En particular el valor del exponente de la ecuación (5) determina, para un rendimiento hidráulico establecido, la geometría óptima del perfil de la tobera. A esta variable se la denominó sencillamente "expo". También de ésta depende la forma en que evoluciona la pérdida de energía dentro de la tobera.

#### **2- CONFRONTACIÓN CON OTRAS INVESTIGACIONES:**

Los trabajos mencionados en el apartado de Bibliografía designados como (6), (7), (8) y (9) precisamente se han utilizado como confrontación permanente desde el inicio de la investigación; más aún, esto motivó la misma desde lo científico.

#### **3- SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS:**

La versión 1.1 sólo permite el diseño de la tobera superior del inyector, y el principal elemento que se obtiene es el gradiente de presiones a lo largo de la geometría de éste. Todavía falta determinar como se comporta el vector resultante del gradiente de presiones con la rotación del inyector (acción de control) para adoptar un criterio matemático de optimación. Es decir la geometría óptima debería ser aquella que permita el máximo rendimiento, con la mínima longitud posible, y con una resultante que establezca esfuerzos mínimos y estables para el accionamiento del servoregulador.

Habría que extender luego el análisis a la tobera inferior utilizando el concepto de transformación conforme de la geometría, es decir "curvando" la tobera. Finalmente se debería unir ambas toberas con un borde de ataque de geometría basada en arcos de círculo. Para cada uno de estos pasos, a su vez, habrá que evaluar indicadores para hallar el criterio de optimización individualmente y luego para todo el conjunto. El trabajo podría considerarse de utilización directa en la industria cuando, con estos criterios, se logre enlazar con un Soft para el diseño del circuito electrónico de control del servoregulador.



## CAPITULO VI

# Conclusiones

---

### ***SOBRE LAS CARTAS DE OPTIMIZACIÓN:***

Las primeras conclusiones que se desprenden de las cartas son las siguientes:

- ➔ Para un valor de rendimiento dado hay varias geometrías posibles, y el inyector más corto corresponde a un tita 1 de 45°.
- ➔ A un mismo largo total de tobera, pero de distinta geometría, corresponden distintos rendimientos, mayores cuanto mayor es el tita 1.
- ➔ A un mayor rendimiento hidráulico corresponde un mayor largo total de tobera.
- ➔ Con relaciones de ancho-largo total dentro del valor 1:3 es posible obtener rendimientos hidráulicos de hasta el 95% con saltos netos de 20 a 80 metros.

### ***SOBRE EL SOFT ALABE V1.1:***

Si bien la versión 1.1 es incompleta demuestra hasta aquí ser una herramienta versátil y potente a la vez. Lo primero por ser ejecutable desde cualquier PC con entorno Windows, fácil de usar y confiable en el ambiente industrial. Lo segundo porque, además, permite abrir una etapa exploratoria en investigación hidrodinámica. Haber logrado esto en forma simultánea sencillamente superó nuestras expectativas.

### ***SOBRE EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:***

Con este trabajo logramos obtener el modelo matemático para el diseño y optimización de inyectores CFT de alta eficiencia. Quedando demostrado que al menos en teoría, asimilando al inyector como toberas dobles de sección rectangular con ángulos de convergencia variable, se pueden obtener diseños con rendimientos hidráulicos superiores al 95%.



## CAPITULO VII

### Bibliografía

---

- MATAIX, Claudio. Turbomáquinas hidráulicas. Madrid, ICAI.
- HYDRAULIC INSTITUTE, Standards, New York, 1955.
- CRANE Co., Flujo de fluídos. México, Mc Graw-Hill, 1993.
- GREENE, Richard W. Válvulas. México, Mc Graw-Hill, 1993.
- ONTARIO MINISTRY OF ENERGY. Small hydro engineering manual. Canadá, 1998.
- MASSARO, Fernando. *Trabajo final. Programa de becas de verano 97*. Instituto Balseiro, 1997.
- SCHUSTER ET AL, Eugenio. *Determinación del torque en el álabe inyector de una turbina de flujo cruzado debido a la distribución de presión en su periferia*. Laboratorio de Ingeniería. Instituto Balseiro, 1996.
- JONG, K. H. & LEE, K. H. *A study on the hydraulic performance characteristics of cross flow turbine (CFT): analysis and experiments*. Korea Institute of Energy & Resources, 1988.
- KIM, J. H. & LEE, K. H. *Analytical and experimental study on the hydraulic performance of cross flow turbine*. Korea Institute of Energy & Resources, 1988.
- MARTÍNEZ, Ernesto N. *Cómo organizar un artículo científico*. Instituto Balseiro, 1996.



## CAPITULO VIII

### Otras Actividades

#### **1- CONFERENCIAS Y CONGRESOS:**

##### **BRINDADOS:**

LAS ENERGÍAS ALTERNATIVAS. Teatro Municipal de Necochea. Pcia. de Buenos Aires.

Invitados: Dr. Ing. Enrique Fernández Navarro. U. N. Cuba.

Ing. Alberto Medina. Miembro de la Asociación Argentina de Hidrógeno.

Ing. Florencio Gamallo. Grupo de energías no Convencionales. UBA.

Ing. Fernando Massaro. Docente e Investigador del programa FEPI 97. UNLZ.

MICROTURBINAS HIDRÁULICAS. Teatro Municipal de Roque Perez. Pcia. de Buenos Aires.

Invitado: Ing. Fernando Massaro. Docente e Investigador del programa FEPI 97. UNLZ.

##### **ASISTENCIA:**

Asistencia por parte del Ing. Fernando Massaro al SEMINARIO ENERGÉTICO. Congreso técnico bienal de la industria eléctrica y luminotécnica. BIEL 99. Escuela Superior Técnica del Ejército. Buenos Aires.

#### **2- VINCULACIÓN CON OTRAS INSTITUCIONES:**

- a) Visita por parte del Ing. Fernando Massaro al Instituto Balseiro. Entrevista con el Dr. Juan C. Bolcich e Ing. Graciano Zanella. San Carlos de Bariloche, Diciembre de 1998.
- b) Visita por parte del Ing. Fernando Massaro a la Microcentral hidroeléctrica de Puerto Blest, instalación experimental hecha por el Centro Atómico Bariloche. Pcia. de Río Negro. Diciembre de 1998.
- c) Programa Hidrológico Internacional UNESCO. Correspondencia periódica desarrollada por el Ing. Marcelo Pagnola con la colaboración del Ing. Fernando Massaro.
- d) Amplia colaboración desarrollada con el Laboratorio de Control Numérico Computarizado de la Facultad de Ingeniería UNLZ.



- e) Valiosas conversaciones mantenidas con el Prof. Ing. Raúl Magallanes. Universidad de Córdoba.
- f) Idem Dr. Enrique Rodríguez Boulán. University of Cornell. USA.
- g) Idem Dr. Eduardo Macagno, Decano University of Columbia of New York. USA.



## CAPITULO IX

# Evaluación del Equipo de Investigación

---

En hoja aparte.



## CAPITULO X

### Anexos

---

- a. Soft ALABE v1.0
- b. Reporte Técnico N° 2: Soft ALABE v1.1. Incluye anexo con Cartas de Optimización.
- c. Incluido en el Informe de Avance parcial (noviembre de 1998): Reporte Técnico N° 1: Banco de Pruebas Experimentales-Propuesta de diseño.