



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

**Departamento:**  
Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas

**Programa de acreditación:**  
**PROINCE**

**Programa de Investigación<sup>1</sup>:**

**Código del Proyecto:**  
C-208

**Título del proyecto**  
Optimización de micro hidro turbinas por aplicación del efecto Venturi

**PIDC:**   
**Elija un elemento.**

**PII:**   
**Elija un elemento.**

**Director:**  
ETEROVIC, Jorge E.  
**Director externo:**

**Codirector:**  
FAUROUX, Luis E.

**Integrantes:**  
DEGAETANI, Omar J.  
GONZALEZ, Ricardo

**Investigador Externo, Asesor- Especialista, Graduado UNLaM:**

**Alumnos de grado: (Aclarar si tiene Beca UNLaM/CIN)**  
PERISSÉ, Alexis M.

**Alumnos de posgrado:**

**Resolución Rectoral de acreditación: N° 154/2019**

**Fecha de inicio: 01/01/2018**

**Fecha de finalización: 31/12/2019**

---

<sup>1</sup> Los Programas de Investigación de la UNLaM están acreditados con resolución rectoral, según lo indica la Resolución HCS N° 014/15 sobre **Lineamientos generales para el establecimiento, desarrollo y gestión de Programas de Investigación a desarrollarse en la Universidad Nacional de La Matanza**. Consultar en el departamento académico correspondiente la inscripción del proyecto en un Programa acreditado.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

## A. Desarrollo del proyecto

### A.1. Grado de ejecución de los objetivos inicialmente planteados, modificaciones o ampliaciones u obstáculos encontrados para su realización (desarrolle en no más de dos (2) páginas)

El proyecto inicialmente se planteó en dos ejes, la modelización matemática y las mediciones sobre una turbina comercial. El desarrollo teórico se cumplió, exponiendo los resultados en distintos congresos, (Revista ReDDI, CAIM 2018, CAIQ 2019 y COINI 2019). El aspecto experimental se vio obstaculizado por los grandes cambios que experimentó la valuación del dólar. El proyecto planteaba adquirir una turbina comercial cuyo costo estimado rondaba los U\$s 2.000, a un cambio de \$18 por cada dólar. Ya en los primeros 6 meses, el tipo de cambio se elevó a aprox \$30, y no era posible contar con los fondos. Es así que se decidió reformular el proyecto, profundizar el aspecto teórico, agregando nuevas alternativas de modelización, no solicitar la segunda cuota, y continuar la investigación con un proyecto 2020-2021 en el que participaran otras universidades interesadas.

## B. Principales resultados de la investigación

### B.1. Publicaciones en revistas (informar cada producción por separado)

Artículo 1:	
Autores	<i>Eterovic, Jorge E.; Fauroux, Luis E.; Degaetani, Omar J.</i>
Título del artículo	<i>El efecto Venturi y su incidencia en el rendimiento de turbinas micro-hidráulicas</i>
N° de fascículo	1
N° de Volumen	3
Revista	<i>ReDDI. Revista electrónica del Depto. de Ingeniería</i>
Año	2018
Institución editora de la revista	<i>Universidad Nacional de La Matanza</i>
País de procedencia de institución editora	<i>Argentina</i>
Arbitraje	SI
ISSN:	2525-1333
URL de descarga del artículo	<a href="https://reddi.unlam.edu.ar/index.php/ReDDi/article/view/56/107">https://reddi.unlam.edu.ar/index.php/ReDDi/article/view/56/107</a>
N° DOI	

### B.2. Libros

Libro 1	
Autores	
Título del Libro	
Año	
Editorial	
Lugar de impresión	
Arbitraje	Elija un elemento.
ISBN:	
URL de descarga del libro	



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

N° DOI	
--------	--

### B.3. Capítulos de libros

Autores	
Título del Capítulo	
Título del Libro	
Año	
Editores del libro/Compiladores	
Lugar de impresión	
Arbitraje	Elija un elemento.
ISBN:	
URL de descarga del capítulo	
N° DOI	

### B.4. Trabajos presentados a congresos y/o seminarios

Autores	<i>Etrovic, Jorge E.; Fauroux, Luis E.; Degaetano, Omar J.; González, Ricardo</i>
Título	<i>Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas</i>
Año	<i>2018</i>
Evento	<i>Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica</i>
Lugar de realización	<i>Tucumán</i>
Fecha de presentación de la ponencia	<i>11/10/2018</i>
Entidad que organiza	<i>FoDAMI – facet</i>
URL de descarga del trabajo (especificar solo si es la descarga del trabajo; formatos pdf, e-pub, etc.)	<i><a href="https://caim2018.com.ar/gestor/wp-content/uploads/2018/10/221.pdf">https://caim2018.com.ar/gestor/wp-content/uploads/2018/10/221.pdf</a></i>
Autores	<i>Fauroux, Luis E.; Rinaldi, Pablo A.; Eterovic, Jorge E.</i>
Título	<i>Simulación del efecto Venturi en una microturbina hidráulica montada en gabinetes de geometría simple</i>
Año	<i>2019</i>
Evento	<i>Congreso Argentino de Ingeniería Química</i>
Lugar de realización	<i>Santa Fe</i>
Fecha de presentación de la ponencia	<i>05/08/2019</i>
Entidad que organiza	<i>Asociación Argentina de Ingenieros Químicos</i>
URL de descarga del trabajo (especificar solo si es la descarga del trabajo; formatos pdf, e-pub, etc.)	<i>ISSN 1850-3519 / ISSN 1850-3500</i>



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

Autores	<i>Fauroux, Luis E.; Rinaldi, Pablo A.; Eterovic, Jorge E.</i>
Título	<i>Simulación del efecto Venturi sobre una turbina microhidráulica tipo Gorlov</i>
Año	2019
Evento	<i>Congreso Argentino de Ingeniería Industrial</i>
Lugar de realización	<i>Río Gallegos – Santa Cruz</i>
Fecha de presentación de la ponencia	01/11/2019
Entidad que organiza	<i>Asoc. Argentina de Carreras de Ing. Industrial y Afines</i>
URL de descarga del trabajo (especificar solo si es la descarga del trabajo; formatos pdf, e-pub, etc.)	<i>ISBN en trámite</i>

### B.5. Otras publicaciones

Autores	
Año	
Título	
Medio de Publicación	

**C. Otros resultados. Indicar aquellos resultados pasibles de ser protegidos a través de instrumentos de propiedad intelectual, como patentes, derechos de autor, derechos de obtentor, etc. y desarrollos que no pueden ser protegidos por instrumentos de propiedad intelectual, como las tecnologías organizacionales y otros. Complete un cuadro por cada uno de estos dos tipos de productos.**

C.1. Títulos de propiedad intelectual. Indicar: Tipo (marcas, patentes, modelos y diseños, la transferencia tecnológica) de desarrollo o producto, Titular, Fecha de solicitud, Fecha de otorgamiento

Tipo	Titular	Fecha de Solicitud	Fecha de Emisión

C.2. Otros desarrollos no pasibles de ser protegidos por títulos de propiedad intelectual. Indicar: Producto y Descripción.

Producto	Descripción

**D. Formación de recursos humanos. Trabajos finales de graduación, tesis de grado y posgrado. Completar un cuadro por cada uno de los trabajos generados en el marco del proyecto.**

D.1. Tesis de grado

Director (apellido y nombre)	y Autor (apellido y nombre)	Institución	Calificación	Fecha /En curso	Título de la tesis



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

D.2

Traba-

### jo Final de Especialización

Director (apellido y nombre)	Autor (apellido y nombre)	Institución	Calificación	Fecha /En curso	Título del Trabajo Final

### D.2. Tesis de posgrado: Maestría

Director (apellido y nombre)	Tesista (apellido y nombre)	Institución	Calificación	Fecha /En curso	Título de la tesis

### D.3. Tesis de posgrado: Doctorado

Director (apellido y nombre)	Tesista (apellido y nombre)	Institución	Calificación	Fecha /En curso	Título de la tesis

### D.4. Trabajos de Posdoctorado

Director (apellido y nombre)	Posdoctorando (apellido y nombre)	Institución	Calificación	Fecha /En curso	Título del trabajo	Publicación

### E. Otros recursos humanos en formación: estudiantes/ investigadores (grado/posgrado/ posdoctorado)

Apellido y nombre del Recurso Humano	Tipo	Institución	Período (desde/hasta)	Actividad asignada <sup>2</sup>
Perissé, Alexis	Alumno	UNLaM	01/01/2018 - 31/12/2019	Búsqueda bibliográfica, Modelización y adaptación, análisis de variantes, análisis de Resultados.

**F. Vinculación<sup>3</sup>:** Indicar conformación de redes, intercambio científico, etc. con otros grupos de investigación; con el ámbito productivo o con entidades públicas. Desarrolle en no más de dos (2) páginas. A raíz de los inconvenientes ocasionados por la variación de los costos, se tomó contacto en la Universidad Nacional de los Comechingones (UNLC, Merlo, San Luis) y con la Universidad Nacional de Misiones (UNaM), quienes mostraron interés en el proyecto, aportando propuestas, y posibilidades de vinculación en un proyecto 2020-2021. En este sentido, para dicho proyecto de propondrá la incorporación de un investigador externo proveniente de la UNLC, cuya tarea será la modelización por elementos finitos, mientras que los resultados serán transferidos a la UNaM, con quién ya la UNLaM ha suscripto un convenio marco, ya que tienen potencialmente la capacidad de aplicar los resultados de la investigación.

### G. Otra información. Incluir toda otra información que se considere pertinente.

<sup>2</sup> Descripción de la/s actividad/es a cargo (máximo 30 palabras)

<sup>3</sup> Entendemos por acciones de “vinculación” aquellas que tienen por objetivo dar respuesta a problemas, generando la creación de productos o servicios innovadores y confeccionados “a medida” de sus contrapartes.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

## H. Cuerpo de anexos:

- Anexo I: Copia de cada uno de los trabajos mencionados en los puntos B, C y D, y certificaciones cuando corresponda.<sup>4</sup>



### APLICACIÓN TEORICA DEL EFECTO VENTURI EN MICRO TURBINAS HIDRAULICAS

Jorge Esteban Eterovic <sup>1</sup>, Luis E. Fauroux <sup>2</sup>, Omar J. Degaetani, Ricardo González

<sup>1</sup> Depto de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
Florencio Varela 1905, San Justo, Buenos Aires, Argentina  
correo-e: eterovic@unlam.edu.ar.

<sup>2</sup> Depto de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
Florencio Varela 1905, San Justo, Buenos Aires, Argentina  
correo-e: lfauroux@unlam.edu.ar.

#### RESUMEN

La fragilidad medioambiental ha motivado la búsqueda de fuentes alternativas de energía. Sin embargo el costo para su obtención es por el momento uno de los puntos que obstaculiza las inversiones, más aún si se trata de baja escala. Por este motivo es que este grupo plantea optimizar turbinas hidráulicas, de río, de baja potencia, mediante la aplicación del efecto Venturi. Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia. El efecto Venturi provoca una depresión aguas abajo, a la salida del equipo, que se traduce en una succión en la turbina. Un número importante de fenómenos en mecánica de fluidos se describen mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, que establecen los efectos dinámicos de fuerzas externas aplicadas, y fuerzas internas, de un fluido que se asume newtoniano. El resultado esperado es lograr un aumento en la velocidad dentro de la turbina, y por ende una optimización respecto de la configuración inicial. Para ello se relevará la información correspondiente al diseño de turbinas, y la simulación del diseño. Las simulaciones fueron realizadas en un entorno de desarrollo integrado de alto nivel para resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales mediante elementos finitos. Contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado. Dado que la implementación domiciliaria puede ser inicialmente costosa, se propone la implementación en barrios cerrados y/o clubes ribereños. Este tipo de locaciones poseen necesidades nocturnas cuyos servicios que podrían ser sostenidos por la producción de turbinas de baja potencia, dependiendo de la cantidad del suministro requerido. El cálculo de la cantidad de turbinas dependerá del requisito, pero el período de amortización dependerá de los costos.

**Palabras Claves:** Turbina, Hidráulica, Venturi



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: dpmec@hemera.unt.edu.ar

<sup>4</sup> En caso de libros, podrá presentarse una fotocopia de la primera hoja significativa o su equivalente y el índice.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



## 1. INTRODUCCIÓN

Las turbinas micro hidráulicas son una opción para la obtención de energía limpia, mediante una corriente de agua. Si el curso de agua, sobre el que se colocan, es de régimen permanente o con fluctuaciones dentro de sus especificaciones, entonces serán una fuente continua de electricidad. Se trata de dispositivos simples, de baja potencia. El presente trabajo tomó aquellas de hasta 1 kwh. Si bien existen, en el mercado, algunas que alcanzan los 6 kwh, éstas tienen un diámetro considerablemente mayor, lo que implica mayor requisito en la profundidad del cauce, restringiendo los posibles beneficiarios.

Las Figura 1 corresponde a una de éstas micro turbinas comerciales, y la Figura 2 muestra cómo se observa en operación.



Figura 1 – Micro Turbina de 0,6 kwh



Figura 2 – Micro Turbina en operación

En la Figura 2, se puede ya a intuir el problema a investigar. Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia, y el agua fluirá por el camino que menor resistencia oponga. La turbulencia actúa como un efecto “tapón” para el ingreso del fluido en la turbina, lo que implica que, respecto la velocidad del flujo de agua, la velocidad dentro de la turbina será sensiblemente menor, y por lo tanto su rendimiento.

Como es de esperar, todo equipo tiene especificaciones técnicas, siendo relevantes para este proyecto sus dimensiones físicas, y la velocidad mínima requerida por parte de la vía fluvial.

Las especificaciones de una micro turbina como la de la Figura 1, se muestran en la Tabla 1



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



Tabla 1 – Especificaciones de la micro turbina de referencia

Datos	Parámetros técnicos
generador de potencia nominal	0.6KW
generador de potencia de salida máximo	12KW
generador de potencia Real	Re: Curva de potencia Cuadro
objetivo actual velocidad	0.6 m/s-2.5m/s
mínimo ancho de vía fluvial	No menos de 900mm
bajo nivel de agua	No menos de 500mm
la frecuencia y la tensión de salida	50/60Hz monofásico 110 V-220 V*
la capacidad del inversor	monofásico 100V-500VA
peso del cuerpo principal de la turbina y tamaño	37 kg; W800mm x D820mm x H1450mm
voltaje de la batería	48 V
caja de control de potencia de salida	adaptado con 1 o 2
peso de la caja de Control y tamaño	17 kg; W310mm x D455mm x H205mm

## 2. EL EFECTO VENTURI

La idea del efecto Venturi es una consecuencia del análisis de la problemática, si la turbulencia provoca una interferencia, pues hay que intentar evitarla, o deshacerla. Muchas son las aplicaciones que se le han dado a este efecto, siendo una de ellas la trampa de vacío. Figura 3

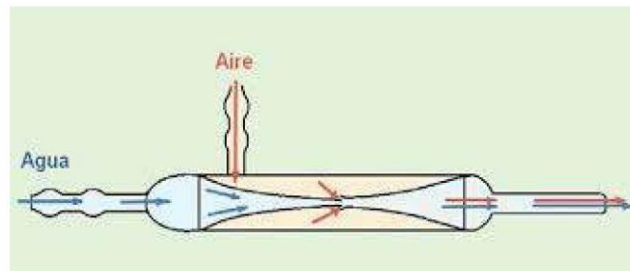


Figura 3 – Trampa de vacío

En una trampa de vacío, la corriente de agua circulante por el tubo central, abierto en el sentido del flujo, genera una pérdida de presión respecto del cuerpo que lo rodea, que a su vez está abierto al medio ambiente.



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)





<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



Análogamente, es posible pensar en una turbina instalada dentro de una nueva carcasa. La función de esta segunda abtbuladura, es la de evitar la dispersión del flujo aguas abajo, conduciendo el flujo libre hacia el final de la turbina. El efecto Venturi provoca una depresión aguas abajo, a la salida de la turbina, que se traduce en una succión sobre la entrada, la que disgrega el "tapón", y conseguiría una mayor velocidad de paso por la turbina. La consecuencia de estos hechos es el aumento de la producción de energía, sabiendo que no podrán sobrepasarse los límites de diseño.

### 3. METODOLOGIA

El objetivo es optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas mediante la aplicación de este efecto. Para ello se relevará la información correspondiente al diseño de turbinas y la simulación del diseño. Al mismo tiempo, se buscará la mejor relación precio-calidad, entre los distintos oferentes de mercado. El caso de estudio está entonces representado por la Figura 4

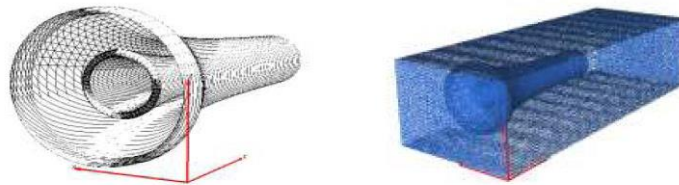


Figura 4 – Caso de estudio, turbina sumergida

Un número importante de fenómenos en mecánica de fluidos se describen mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Establecen los efectos dinámicos de fuerzas externas aplicadas, y fuerzas internas, de un fluido que se asume Newtoniano. Las fuerzas internas se producen a causa de la presión y la viscosidad del fluido [1,2].

El contorno del dominio del fluido se asume Lipschitz continuo, o sea que se trata de una superficie cerrada y suficientemente regular. Así, el flujo dependiente del tiempo de un fluido viscoso e incompresible está gobernado por el balance de momentos [3]:

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v - \gamma \nabla (\nabla \cdot v) + \nabla p = b \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad,  $p$  presión,  $b$  fuerza de volumen (fuerza externa),  $\gamma = \mu/\rho$ , es la viscosidad cinemática, con  $\rho$  densidad del fluido. Debido al hecho de que en un continuo incompresible la velocidad de cambio de la densidad de masa siguiendo el movimiento es cero, se cumple que,  $\nabla \cdot v = 0$ . Con esta condición la ecuación diferencial queda:

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v + \nabla p = b \quad (2)$$

Organizan

[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



La ecuación de momentos se expresa de esta forma, porque aparte de diferenciar el término convectivo,  $(v \cdot \nabla)v$ , esta formulación desacopla las componentes de velocidad.

El problema de Navier-Stokes debe completarse con condiciones iniciales, y de contorno, que típicamente permiten asignar un valor de velocidad,  $v_D$ , a una porción del contorno,  $\Gamma_D$ :

$$v(x, t) = v_D(x, t) \quad (3)$$

La tracción del contorno  $t$ , en la porción complementaria  $\Gamma_N$ :

$$n \cdot \sigma(x, t) = t(x, t) \quad (4)$$

Con,  $x$  en  $\Gamma_N$ , donde  $n$ , es el vector unitario normal al contorno y,  $\sigma$ , la fuerza.

No se requieren condiciones iniciales para la presión del fluido, esto es a causa de que no hay derivada de tiempo. En condiciones de Dirichlet, en todo el contorno,  $\Gamma_N = 0$ , la presión está presente mediante su gradiente, y así está determinada solo hasta una constante arbitraria. En este caso, es usual imponer la presión promedio, o el valor de la presión en un punto, para definir de manera única el campo de presión. Si se aplica tracción en el contorno, en un fluido que obedece a la ley de Stokes [3], se cumple que:

$$n \cdot \sigma = -pn + 2\gamma n \cdot \nabla^2 v = t \quad (5)$$

En 2D, y con referencia a un sistema cartesiano local  $(n, \tau)$ , se obtienen dos ecuaciones:

$$-p + 2\gamma(\partial v_n / \partial n) = t_n \quad (6)$$

La Ecuación 6 envuelve, la presión y el gradiente de velocidad, y representa el esfuerzo normal aplicado,

$$\gamma(\partial v_x / \partial n + \partial v_n / \partial \tau) = t_x \quad (7)$$

La Ecuación 7, modela el esfuerzo tangencial. Si la tracción en el contorno es cero, la presión es proporcional al gradiente de velocidad.

### 3.1. Interpretación de la presión

En el planteo numérico de un flujo Newtoniano, el tensor de esfuerzo, y el de deformación del fluido, están linealmente relacionados. Al agregar la condición de incompresibilidad, se obtiene la ley de Stokes, entonces la presión tiene una interpretación puramente mecánica. Esto no está conectado con la definición termodinámica usual, presente por ejemplo, en la medición manométrica, en el cálculo de flujo de un tubo de Pitot, o bien en los cálculos de un Venturi [2].



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



### 3.2. Planteo de las ecuaciones usando el número de Reynolds

La forma adimensional, de las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtiene reemplazando la viscosidad cinemática  $\gamma$ , por la inversa del número de Reynolds ( $Re$ ) definido como

$$Re = VL/\gamma \quad (8)$$

Donde,  $V$  y  $L$ , representan velocidad característica, y longitud característica del flujo, respectivamente. Conceptualmente el número de Reynolds caracteriza el cociente entre las fuerzas de inercia, y las fuerzas viscosas. En ausencia de fuerza de volumen, las ecuaciones de Navier-Stokes quedan:

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - (1/Re) \nabla^2 v + \nabla p = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (10)$$

Debido a la presencia del término convectivo no lineal, y no simétrico, en la ecuación de momentos, en flujos de alto Reynolds aparecen problemas de estabilidad numérica. Tal es el caso del flujo en un río, ya que domina la convección, y para este problema, la formulación estándar Galerkin es inestable [3,4,5]. Las técnicas de estabilización, tales como SUPG (Streamline-Upwind-Petrov-Galerkin), GLS (Galerkin Least-Squares), SGS (Sub-Grid Scale), o LS (Least-Squares), deben usarse, para obtener soluciones significativas mediante elementos finitos, en flujos de este tipo.

Otra fuente de dificultad numérica, es la condición de incompresibilidad. La ecuación de continuidad, para un fluido incompresible, consiste en una restricción en el campo de velocidad, libre de divergencia. Luego, la presión tiene que ser considerada como una variable no relacionada a ninguna ecuación constitutiva. Su presencia, en la ecuación de Navier-Stokes, tiene el propósito de introducir un grado de libertad adicional, necesitado para satisfacer un auto-ajuste instantáneo, actuando como un multiplicador de Lagrange de la restricción de incompresibilidad, y así, generando un acoplamiento entre la velocidad, y la presión desconocidos.

### 3.3. Representación del flujo mediante líneas de corriente

En el caso de movimiento en 2D,

$$v = (v_1, v_2, 0) \quad (11)$$

Siendo,  $v_1$  y  $v_2$  independientes de  $x_3$ . De la condición de incompresibilidad

$$\nabla \cdot v = \partial v_1 / \partial x_1 + \partial v_2 / \partial x_2 = 0 \quad (12)$$





<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



Las velocidades se pueden escribir como:

$$v_1 = \partial \psi / \partial x_2 \quad (13)$$

$$v_2 = \partial \psi / \partial x_1 \quad (14)$$

Por último, la función escalar de corriente,  $\psi(x, t)$ , se escribe como

$$\psi(x, t) - \psi_0 = \int_0^P \nabla \psi \cdot dx = \int_0^P [v \times dx]_3 \quad (15)$$

En la Ecuación 15,  $\psi_0$  es una constante, y la integral es tomada a lo largo de una curva arbitraria, uniendo algún punto de referencia O, al punto P, con coordenadas  $x$ ; notar que  $dx$  representa un vector tangente a la curva arbitraria.

Es común en dinámica de fluido computacional (CFD), proveer una instantánea de un campo de flujo, dibujando una familia de líneas de corriente (curvas a  $\psi$  constante y  $V$  tangente). En el contexto de elementos finitos, los contornos de líneas de corriente (con intervalos especificados en  $\psi$ , entre pares de líneas de corriente vecinas), son obtenidas integrando numéricamente, a lo largo de los lados de los elementos, o bien, a través de la solución de una ecuación de Poisson [3,5].

Las simulaciones se realizaron en FreeFem++, (Open Source software) entorno de desarrollo integrado de alto nivel (IDE), para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE), en 2D y 3D, mediante elementos finitos. La simulación contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado (mesh generator), y visualizadores propios. Como visualizador alternativo externo se utilizó Paraview (OpenSource).

#### 4. RESULTADOS

Cabe destacar que, en ejecuciones previas, fueron ajustándose tanto el espaciado entre carcacas, como las longitudes de los bordes de ingreso, y egreso de la carcasa externa. Así, y utilizando los conceptos mencionados, se realizaron simulaciones donde se agregó la segunda carcasa. Los resultados son los expuestos en las Figuras 5, 6, y 7. Estas figuras corresponden a distintos tiempos de la simulación. Las líneas que aparentan filigranas, indican los nodos de medición de la velocidad en la simulación.



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

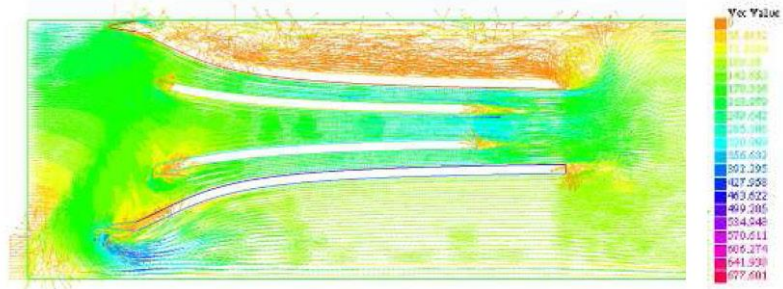


Figura 5 – Perfil de velocidades al inicio de la simulación.

La Figura 5 indica un leve aumento de velocidad entre la entrada (verde), y la salida (celeste)

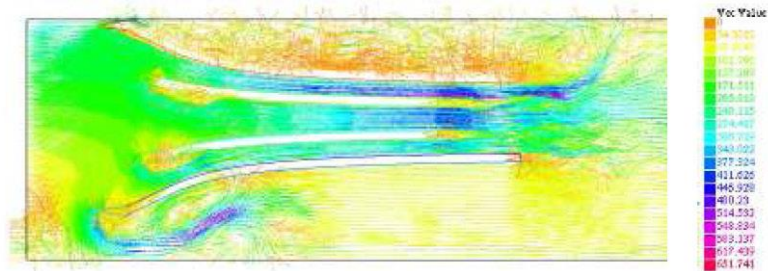


Figura 6 – Perfil de velocidades a un tiempo de dos minutos de iniciada la simulación.

A los dos minutos se observa, en la Figura 6, que el flujo gana velocidad en ambos extremos, donde aparecen zonas celestes a la entrada, que ganan intensidad a la salida (azul).

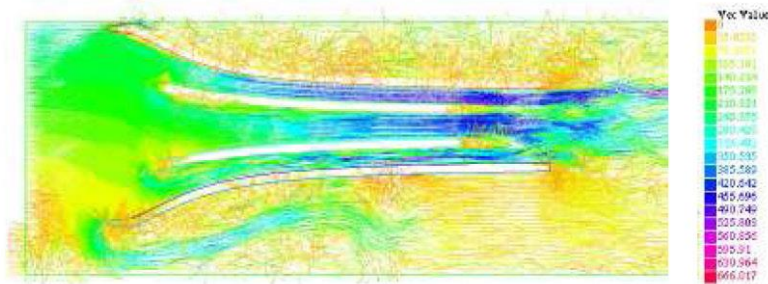


Figura 7 – Perfil de velocidades a 4 minutos de iniciada la simulación



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpmec@herreria.unt.edu.ar](mailto:dpmec@herreria.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



En la tercera imagen (Figura 7) ya se puede observar un cambio sensible en las velocidades (azul), tanto en el tubo interior, como en la carcasa que induce el efecto Venturi. A modo de ejemplo, se presentan parte de los datos tabulados hacia el final de la simulación.

Tabla 2. Extracto de los datos tabulados correspondientes al tiempo final de la simulación, en nodos a la entrada de la turbina (FreeFem++, Open Source software)

132,651374	120,178024	169,741337	172,202552	169,001539
163,291981	118,258777	132,140519	124,240453	122,950771
121,301543	120,3587	125,996883	112,032783	119,336653
114,311402	116,16689	111,961283	111,064223	112,825591
112,990355	114,872321	114,033395	101,269164	99,0256238

Tabla 3. Extracto de los datos tabulados correspondientes al tiempo final de la simulación, en nodos de la zona intermedia de la turbina (FreeFem++, Open Source software)

239,015493	245,011741	242,490894	245,464518	216,679843
246,188764	201,190474	241,332041	239,941432	235,809607
236,288487	224,26725	228,870598	228,250984	215,870997
211,677885	215,077699	223,646099	206,84496	210,001176
210,742468	210,200294	211,958747	208,520225	209,250859
207,76659	219,720976	209,558006	208,566881	211,141009

Tabla 4. Extracto de los datos tabulados correspondientes al tiempo final de la simulación, en nodos a la salida de la turbina (FreeFem++, Open Source software)

152,931826	345,050863	418,780621	379,097042	379,740185
363,797422	389,53182	360,856063	377,709011	295,488921
380,051075	356,362817	367,087299	366,272245	365,043405
317,475325	332,911011	288,892372	272,951353	211,817027
274,263851	54,2822589	122,395413	312,145589	86,5394055
356,489156	221,856453	381,263548	314,479393	317,066427



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



## 5. CONCLUSIONES

Tanto la evolución de la velocidad, mostrada en las Figuras 5, 6 y 7, como los datos tabulados en las Tablas 2, 3 y 4, muestran que efectivamente, la colocación de una segunda carcasa aumenta la velocidad en la carcasa interior de la turbina, lo que implica un aumento del rendimiento, lo que no significa que aumente la capacidad del equipo. La conclusión es que, colocando una segunda carcasa, es posible maximizar el rendimiento, y aunque disminuya la velocidad del curso de agua, el rendimiento no decaerá sensiblemente respecto del óptimo en esas condiciones.

Dado que el objetivo es, en primer lugar, comprobar si el efecto Venturi es capaz de mejorar el rendimiento, no se desarrolló aún un modelo de optimización, línea de investigación que queda abierta gracias a los resultados de este trabajo.

Además, se realizará un relevamiento para la evaluación económica para la implementación de la propuesta. Por otro lado, los costos de energía han aumentado en estos últimos años, lo que permite proponer soluciones con periodos de amortización aceptables.

## 6. REFERENCIAS

- [1] L. D. Landau, E. M. Lifshitz. *Fluids Mechanics*. Pergamon Press, 1987.
- [2] Ralnd V. Giles. *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. MacGraw-Hill, 2nd Ed, Serie Schaum.
- [3] J. Donea, A. Huerta. *Finite Element Method for Flow Problems*. John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [4] O.C. Zienkiewics, R. L. Taylor. *The Finite Element Method, The Basis*. Butterworth-Heinmann, 5th edición, 2000.
- [5] O. C. Zienkiewics, R. L. Taylor. *The Finite Element Method, Vol3, Fluid Dynamics*. Butterworth-Heinmann, 5th edición, 2000.



[www.caim2018.com.ar](http://www.caim2018.com.ar)

Avda. Independencia 1800,  
San Miguel de Tucumán (C.P. 4000) - Tucumán - Argentina  
Teléfono: +54 381 4364093 - Fax: +54 381 4364157  
Email: [dpnec@herrera.unt.edu.ar](mailto:dpnec@herrera.unt.edu.ar)



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

AAIQ - X Congreso Argentino de Ingeniería Química CAIQ2019

## SIMULACION DEL EFECTO VENTURI EN UNA MICROTURBINA HIDRAULICA MONTADA EN GABINETES DE GEOMETRIA SIMPLE

Fauroux L. E.1\*, Rinaldi, P., Eterovic, J. E.

Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas

(Universidad Nacional de La Matanza)

Florenio Varela 1905 (1754) San Justo - Argentina

lfauroux@unlam.edu.ar

**Resumen.** La fragilidad medioambiental ha motivado la búsqueda de fuentes alternativas de energía. Sin embargo el costo para su obtención es por el momento uno de los puntos que obstaculiza las inversiones, más aún si se trata de baja escala. Por este motivo es que este grupo plantea optimizar turbinas hidráulicas, de río, de baja potencia. La optimización podrá ser evaluada ya desde el costo, o desde la producción. Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia, la que actúa como un efecto “tapón” para el ingreso del fluido a la turbina. La incorporación de una segunda carcasa produciría un efecto Venturi, provocando una depresión aguas abajo, la que se traduce en una succión dentro la turbina. Así se consigue un incremento en la velocidad de paso, y por ende su optimización. Esto quiere decir que, o bien puede reducirse el tamaño de la turbina y mantener la cantidad de energía producida, o conservar el tamaño original aumentando su eficiencia. El beneficio de esta implementación es una mejor relación costo-beneficio en la producción de energía. Más allá que los costos para la adquisición de la energía han aumentado en estos últimos años, una propuesta de optimización debe ir acompañada también de un período de amortización aceptable.

**Palabras clave:** SIMULACION, VENTURI, MICROTURBINAS

### 1 Introducción

Las turbinas micro hidráulicas son una opción para la obtención de energía limpia, mediante una corriente de agua. Si el curso de agua, sobre el que se colocan, es de régimen permanente o con fluctuaciones dentro de sus especificaciones, entonces serán una fuente continua de electricidad. Se trata de dispositivos simples, de baja potencia. El presente trabajo tomó aquellas de hasta 1 kWh. Si bien existen, en el mercado, algunas que alcanzan los 6 kWh, éstas tienen un diámetro considerablemente mayor, lo que implica mayor requisito en la profundidad del cauce, restringiendo los posibles beneficiarios. Las Figura 1 corresponde a una de éstas micro turbinas comerciales, y la Figura 2 muestra cómo se observa en operación.

1 \* A quien debe enviarse toda la correspondencia





<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

IX CAIQ2019



Fig. 1. Micro Turbina de 0,6 kwh



Fig. 2. Micro Turbina en operación

En la Figura 2, se puede ya intuir el problema a investigar. Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia, y el agua fluirá por el camino que menor resistencia oponga. La turbulencia actúa como un efecto “tapón” para el ingreso del fluido en la turbina, lo que implica que, respecto a la velocidad del flujo de agua, la velocidad dentro de la turbina será sensiblemente menor, y por lo tanto su rendimiento. Como es de esperar, todo equipo tiene especificaciones técnicas, siendo relevantes para este proyecto sus dimensiones físicas, y la velocidad mínima requerida por parte de la vía fluvial.

Las especificaciones de una microturbina como la de la Figura 1, se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Especificaciones de la micro turbina de referencia

Datos	Parámetros técnicos
generador de potencia nominal	0.6KW
generador de potencia de salida máximo	12KW
generador de potencia Real	Re: Curva de potencia Cuadro
objetivo actual velocidad	0.6 m/s-2.5m/s
mínimo ancho de vía fluvial	No menos de 900mm
bajo nivel de agua	No menos de 500mm
la frecuencia y la tensión de salida	50/60Hz monofásico 110 V-220 V*
la capacidad del inversor	monofásico 100V-500VA
peso del cuerpo principal de la turbina y tamaño	37 kg; W800mm x D820mm x H1450mm
voltaje de la batería	48 V
caja de control de potencia de salida	adaptado con 1 o 2
peso de la caja de Control y tamaño	17 kg; W310mm x D455mm x H205mm

## 2 Metodología

Los fenómenos en mecánica de fluidos pueden ser descriptos mediante las ecuaciones de Navier-Stokes (Landau, 1987, Giles, 1969). Las fuerzas internas son producto de la presión y la viscosidad del fluido. El contorno del dominio del fluido se asume como una superficie cerrada y suficientemente regular. Así, el flujo dependiente del tiempo de un fluido viscoso e incompresible está gobernado por el balance de momentos. Se asignaron un valor de velocidad a una porción del contorno, y la tracción del contorno en la porción complementaria. No se requiere condiciones iniciales para la presión del fluido, ya que no existe derivada de tiempo. La presión está presente mediante su gradiente, y determinada por una constante arbitraria, es usual imponer la presión promedio, o el valor en un punto, para definir de manera única el campo de presión. En el planteo numérico de un flujo newtoniano, el tensor de esfuerzo, y el de deformación del fluido, están linealmente relacionados, agregando la condición de incompresibilidad se obtiene la ley de Stokes, por lo que la presión tiene una interpretación puramente mecánica. La forma adimensional de las ecuaciones de Navier-Stokes se obtiene reemplazando la viscosidad cinemática por la inversa del número de Reynolds (Re). Conceptualmente el número de Reynolds, caracteriza el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. La presencia del término convectivo no lineal, y no simétrico, en la ecuación de momentos, provoca inestabilidad numérica en flujos de alto Re, donde domina la convección. Pueden utilizarse, entonces, técnicas de estabilización como SUPG (Streamline-



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

IX CAIQ2019

Upwind-Petrov-Galerkin), GLS (Galerkin Least-Squares), SGS (Sub-Grid Scale), o LS (Least-Squares), para obtener soluciones mediante elementos finitos. La ecuación de continuidad para un fluido incompresible consiste en una restricción en el campo de velocidad, libre de divergencia, la presión debe ser considerada como una variable no relacionada a ninguna ecuación constitutiva. Su presencia, en la ecuación de Navier-Stokes, busca introducir un grado de libertad adicional, como un multiplicador de Lagrange de la restricción de incompresibilidad, necesario para satisfacer un auto-ajuste instantáneo, generando así un acoplamiento entre la velocidad y la presión. Las simulaciones fueron realizadas en FreeFem++, entorno de desarrollo integrado de alto nivel para resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en 2D y 3D mediante elementos finitos, contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado, y visualizadores propios.

El objetivo es optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas mediante la aplicación de este efecto. Para ello se relevará la información correspondiente al diseño de turbinas y la simulación del diseño. Al mismo tiempo, la Fig. (3) por ejemplo, representa el diseño de una carcasa de turbina dentro de un tubo de alcantarilla.



Fig. 3. Planteo de una turbina montada en un tubo de alcantarilla

El contorno del dominio del fluido se asume Lipschitz continuo, o sea que se trata de una superficie cerrada y suficientemente regular. Así, el flujo dependiente del tiempo de un fluido viscoso e incompresible está gobernado por el balance de momentos (Donea, 2003):

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v - \gamma \nabla(\nabla \cdot v) + \nabla p = b \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad,  $p$  presión,  $b$  fuerza de volumen (fuerza externa),  $\gamma = \mu/\rho$ , es la viscosidad cinemática, con  $\rho$  densidad del fluido. Debido al hecho de que en un continuo incompresible la velocidad de cambio de la densidad de masa siguiendo el movimiento es cero, se cumple que,  $\nabla \cdot v = 0$ .

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v + \nabla p = b \quad (2)$$

El problema de Navier-Stokes debe completarse con condiciones iniciales, y de contorno, que típicamente permiten asignar un valor de velocidad,  $v_D$ , a una porción del contorno,  $\Gamma_D$ , y la tracción del contorno  $t$ , en la porción complementaria  $\Gamma_N$ :

$$v(x, t) = v_D(x, t) \quad (3)$$

$$n \cdot \sigma(x, t) = t(x, t) \quad (4)$$

Con,  $x$  en  $\Gamma_N$ , donde  $n$ , es el vector unitario normal al contorno y,  $\sigma$ , la fuerza. No se requieren condiciones iniciales para la presión del fluido, esto es a causa de que no hay derivada de tiempo. En condiciones de Dirichlet, en todo el contorno,  $\Gamma_N = 0$ , la presión está presente mediante su gradiente, y así está determinada solo hasta una constante arbitraria. En este caso, es usual imponer la presión promedio, o el valor de la presión en un punto, para definir de manera única el campo de presión. Si se aplica tracción en el contorno, en un fluido que obedece a la ley de Stokes (Donea, 2003), se cumple que:

$$n \cdot \sigma = -pn + 2\gamma n \cdot \nabla^2 v = t \quad (5)$$



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

IX CAIQ2019

En 2D, y con referencia a un sistema cartesiano local  $(n, \tau)$ , se obtienen dos ecuaciones:

$$-p + 2\gamma(\partial v_n / \partial n) = t_n \quad (6)$$

La Ecuación (6) envuelve la presión y el gradiente de velocidad, y representa el esfuerzo normal aplicado,

$$\gamma(\partial v_\tau / \partial n + \partial v_n / \partial \tau) = t_\tau \quad (7)$$

La Ecuación (7), modela el esfuerzo tangencial. Si la tracción en el contorno es cero, la presión es proporcional al gradiente de velocidad. En el planteo numérico de un flujo Newtoniano, el tensor de esfuerzo, y el de deformación del fluido, están linealmente relacionados. Al agregar la condición de incompresibilidad, se obtiene la ley de Stokes, entonces la presión tiene una interpretación puramente mecánica. Esto no está conectado con la definición termodinámica usual, presente por ejemplo, en la medición manométrica, en el cálculo de flujo de un tubo de Pitot, o bien en los cálculos de un Venturi (Giles, 1969). La forma adimensional, de las ecuaciones de Navier-Stokes, se obtiene reemplazando la viscosidad cinemática  $\gamma$ , por la inversa del número de Reynolds ( $Re$ ) definido como

$$Re = VL/\gamma \quad (8)$$

Donde,  $V$  y  $L$ , representan velocidad característica, y longitud característica del flujo, respectivamente. Conceptualmente el número de Reynolds caracteriza el cociente entre las fuerzas de inercia, y las fuerzas viscosas. En ausencia de fuerza de volumen, las ecuaciones de Navier-Stokes quedan:

$$v_t + (v \cdot \nabla)v - (1/Re)\nabla^2 v + \nabla p = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (10)$$

Debido a la presencia del término convectivo no lineal, y no simétrico, en la ecuación de momentos, en flujos de alto Reynolds aparecen problemas de estabilidad numérica. Tal es el caso del flujo en un río, ya que domina la convección, y para este problema, la formulación estándar Galerkin es inestable (Donea, 2003, Zienkiewicz, 2000a, Zienkiewicz, 2000b). Las técnicas de estabilización, tales como SUPG (Streamline-Upwind-Petrov-Galerkin), GLS (Galerkin Least-Squares), SGS (Sub-Grid Scale), o LS (Least-Squares), deben usarse, para obtener soluciones significativas mediante elementos finitos, en flujos de este tipo. Otra fuente de dificultad numérica, es la condición de incompresibilidad. La ecuación de continuidad, para un fluido incompresible, consiste en una restricción en el campo de velocidad, libre de divergencia. Luego, la presión tiene que ser considerada como una variable no relacionada a ninguna ecuación constitutiva. Su presencia, en la ecuación de Navier-Stokes, tiene el propósito de introducir un grado de libertad adicional, necesitado para satisfacer un auto-ajuste instantáneo, actuando como un multiplicador de Lagrange de la restricción de incompresibilidad, y así, generando un acoplamiento entre la velocidad, y la presión desconocidos.

En el caso de movimiento en 2D, y dada la condición de incompresibilidad

$$v = (v_1, v_2, 0) \quad (11)$$

$$\nabla \cdot v = \partial v_1 / \partial x_1 + \partial v_2 / \partial x_2 = 0 \quad (12)$$

$$v_1 = \partial \psi / \partial x_2 \quad (13)$$

$$v_2 = \partial \psi / \partial x_1 \quad (14)$$

Por último, la función escalar de corriente,  $\psi(x, t)$ , se escribe en la Ec. (15), donde  $\psi_0$  es una constante, y la integral es tomada a lo largo de una curva arbitraria, uniendo algún punto de referencia  $O$ , al punto  $P$ , con coordenadas  $x$ ; notar que  $dx$  representa un vector tangente a la curva arbitraria.

$$\psi(x, t) - \psi_0 = \int_0^P \nabla \psi \cdot dx = \int_0^P [v \times dx]_3 \quad (15)$$



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

IX CAIQ2019

Es común en dinámica de fluido computacional (CFD), proveer una instantánea de un campo de flujo, dibujando una familia de líneas de corriente (curvas a  $\psi$  constante y  $V$  tangente). En el contexto de elementos finitos, los contornos de líneas de corriente (con intervalos especificados en  $\psi$ , entre pares de líneas de corriente vecinas), son obtenidas integrando numéricamente, a lo largo de los lados de los elementos, o bien, a través de la solución de la ecuación de Poisson (Donea, 2003, Zienkiewics, 2000b)).

### 3 Conclusiones

Utilizando los conceptos mencionados, se realizaron simulaciones donde se agregó la segunda carcasa. El perfil de velocidad inicial es lineal: desde 0 en el fondo a 1 m/seg en la superficie, el recorrido completo es de 5 m. y una profundidad de 1.2m. Los resultados (ver Fig. 4) donde las velocidades inferiores se representan en color naranja (superior) y las altas en violeta (inferior), de 0 m/s a 7m/s. En general, se puede apreciar el beneficio del agregado de una segunda carcasa, y en particular una mejor respuesta del montaje sobre un caño de alcantarilla.

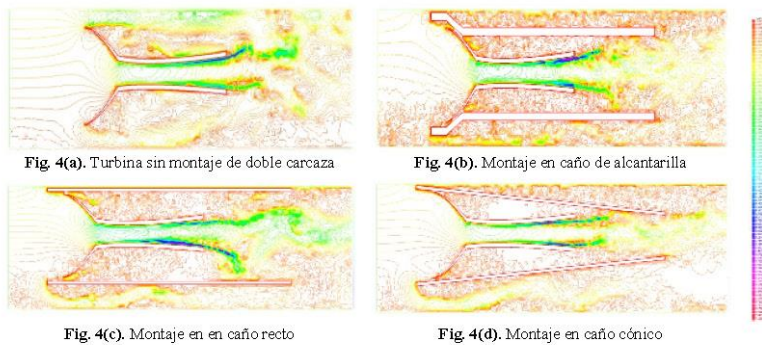


Fig. 4(a). Turbina sin montaje de doble carcasa

Fig. 4(b). Montaje en caño de alcantarilla

Fig. 4(c). Montaje en en caño recto

Fig. 4(d). Montaje en caño cónico

Fig. 4. Simulación de los perfiles de velocidad según la geometría del montaje

La apreciación mencionada con anterioridad se sostiene con las gráficas de comparación de velocidades máximas obtenidas (ver Fig. 5).

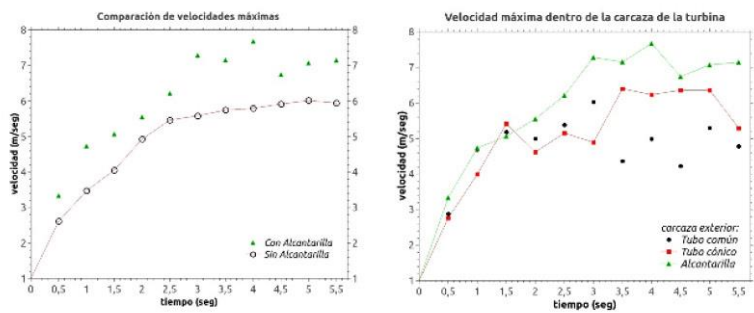


Fig. 5. Comparación de las velocidades máximas según el montaje

“100 años de Ingeniería Química en Argentina y Latinoamérica”  
AAIQ, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

IX CAIQ2019

En el mismo sentido, se observa en las gráficas de presión (ver Fig. 6), que el montaje genera el efecto Venturi, provocando la depresión esperada aguas abajo.

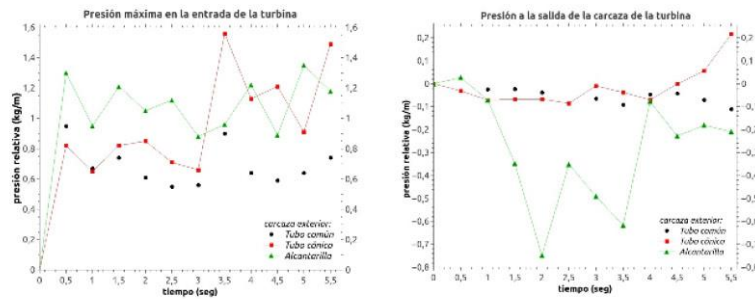


Fig. 6. Presiones máximas, a la entrada y salida, según el montaje

Tanto la evolución de la velocidad, como la de la presión, muestran que la colocación de una segunda carcaza aumenta la velocidad en el interior de una turbina, lo que implica un aumento de la eficacia, lo que no significa que aumente la capacidad nominal del equipo. Se concluye que la colocación de una segunda carcaza es una metodología útil para maximizar el aprovechamiento de la velocidad de superficie, reduciendo las pérdidas por baja en la velocidad del curso de agua, respecto a la eficiencia esperada en el óptimo de las condiciones de diseño.

Habiendo cuenta de las conclusiones positivas, se evaluará implementar esta propuesta utilizando turbinas más económicas, del tipo Gorlov, se realizará un relevamiento para la evaluación económica de una instalación en cursos de menor velocidad y profundidad.

#### Referencias

- Landau, L. D., Lifshitz, E. M. (1987). Fluids Mechanics. Pergamon Press.
- Giles, R. V. (1969). Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. MacGraw-Hill, 2nd Ed, Serie Schaum.
- Donea, J., Huerta, A. (2003). Finite Element Method for Flow Problems. John Wiley & Sons Ltd.
- Zienkiewics, O. C. , Taylor, R. L. (2000). The Finite Element Method, The Basis. Butterworth-Heinmann, 5th edición.
- Zienkiewics, O.C. , Taylor, R. L. (2000). The Finite Element Method, Vol3, Fluid Dynamics. Butterworth-Heinmann, 5th edición, 2000.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

## XII Congreso Argentino de Ingeniería Industrial

### “Simulación del efecto Venturi sobre una turbina microhidráulica tipo Gorlov”

*Fauroux, Luis Enrique<sup>1</sup>; Rinaldi, Pablo<sup>2</sup>; Eterovic, Jorge Esteban<sup>1</sup>*

*<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nac. de La Matanza.  
F. Varela 1905. San Justo, Buenos Aires, Argentina. [lfauroux@unlam.edu.ar](mailto:lfauroux@unlam.edu.ar)*

*<sup>(2)</sup> Dpto. de Cs. Ambientales y Gestión del agua. Universidad Nac. de Los Comechingones.  
Héroes de Malvinas s/n, Villa de Merlo, San Luis, Argentina.*

#### RESUMEN

La implementación de microturbinas hidráulicas es una alternativa evaluada, por barrios cerrados y/o clubes ribereños, para la obtención de energía limpia, y de bajo costo. Sin embargo, la eficiencia de una turbina flujo es afectada por la turbulencia que se genera a su entrada, la que actúa como un efecto “tapón” para el ingreso del fluido. La incorporación de una segunda carcasa produciría un efecto Venturi, provocando una depresión aguas abajo, la que se traduce en una succión dentro la turbina, y el consiguiente incremento en la velocidad de paso. El beneficio de esta implementación es una mejor relación costo-beneficio en la producción de energía. La dimensión de la turbina entonces es, indirectamente, una función de la velocidad del curso de agua, y la profundidad de su cauce. Con el objeto de mejorar la eficiencia se plantea el estudio del flujo mediante simulación FEM (Finite Element Method), usando gabinetes exteriores de geometría simple, como caños alcantarilla, tubos rectos, o cónicos, fácilmente adquiribles en mercado, sobre una turbina tipo Gorlov. Los fenómenos en mecánica de fluidos pueden ser descriptos mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, y las simulaciones serán realizadas en FreeFem++, entorno de desarrollo integrado de alto nivel para resolución de ecuaciones diferenciales mediante elementos finitos, contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado, y visualizadores propios.

**Palabras Claves:** Simulación, Venturi, Microturbinas.

#### ABSTRACT

The implementation of hydraulic microturbines is an alternative evaluated, by closed neighborhoods and / or riverside clubs, to obtain clean, low-cost energy. However, the efficiency of a turbine flow is affected by the turbulence that is generated at its inlet, which acts as a “plug” effect for fluid entry. The incorporation of a second carcass would produce a Venturi effect, causing a depression downstream, which translates into a suction inside the turbine, and the consequent increase in the speed of passage. The benefit of this implementation is a better cost-benefit ratio in energy production. The size of the turbine is then, indirectly, a function of the speed of the watercourse, and the depth of its channel. In order to improve efficiency, the study of the flow by means of FEM simulation (Finite Element Method) is proposed, using external cabinets of simple geometry, such as sewer pipes, straight pipes, or conical, easily available on the market, on a Gorlov type turbine. Fluid mechanics phenomena can be described using the Navier-Stokes equations, and the simulations will be performed in FreeFem ++, a high-level integrated development environment for solving differential equations using finite elements, it contains stabilization algorithms, automated mesh generator, and own viewers.

**Key words:** Simulation, Venturi, Microturbines



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

## 1. Introducción

Las turbinas micro hidráulicas son una opción para la obtención de energía limpia, mediante una corriente de agua. Si el curso de agua, sobre el que se colocan, es de régimen permanente o con fluctuaciones dentro de sus especificaciones, entonces serán una fuente continua de electricidad. Se trata de dispositivos simples, de baja potencia. El presente trabajo tomó aquellas de hasta 1 kW. Si bien existen, en el mercado, algunas que alcanzan los 6 kW, éstas tienen un diámetro considerablemente mayor, lo que implica mayor requisito en la profundidad del cauce, restringiendo los posibles beneficiarios.

Las Figura 1 corresponde a una de éstas micro turbinas comerciales, y la Figura 2 muestra cómo se observa en operación.



Fig. 1. Micro Turbina Gorlov

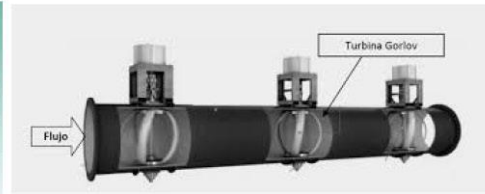


Fig. 2. Opción actual

En la Figura 2, se puede ya a intuir el problema a investigar. Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia, y el agua fluirá por el camino que menor resistencia oponga. La turbulencia actúa como un efecto "tapón" para el ingreso del fluido en la turbina, lo que implica que, respecto a la velocidad del flujo de agua, la velocidad dentro de la turbina será sensiblemente menor, y por lo tanto su rendimiento.

Como es de esperar, todo equipo tiene especificaciones técnicas, siendo relevantes para este proyecto sus dimensiones físicas, y la velocidad mínima requerida por parte de la vía fluvial. Las especificaciones de una microturbina como la de la Figura 1, se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Especificaciones de la micro turbina de referencia

1 Datos	2 Parámetros técnicos
generador de potencia nominal	0.6 kW
generador de potencia de salida máximo	12 kW
generador de potencia Real	Re: Curva de potencia Cuadro
objetivo actual velocidad	0.6 m/s-2.5m/s
mínimo ancho de vía fluvial	No menos de 900mm
bajo nivel de agua	No menos de 500mm
la frecuencia y la tensión de salida	50/60Hz monofásico 110 V-220 V*
la capacidad del inversor	monofásico 100V-500VA
peso del cuerpo principal de la turbina y tamaño	37 kg; W800mm x D820mm x H1450mm
voltaje de la batería	48 V
caja de control de potencia de salida	adaptado con 1 o 2
peso de la caja de Control y tamaño	17 kg; W310mm x D455mm x H205mm

## 2. El Efecto Venturi

La idea del efecto Venturi es una consecuencia del análisis de la problemática, si la turbulencia provoca una interferencia, pues hay que intentar evitarla, o deshacerla. Muchas son las aplicaciones que se le han dado a este efecto, siendo una de ellas la trampa de vacío. Figura 3



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

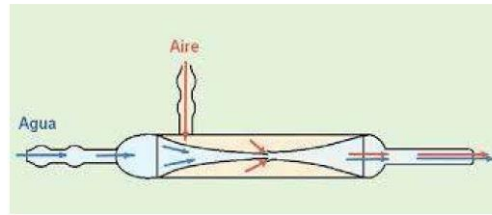


Figura 3 – Trampa de vacío

En una trampa de vacío, la corriente de agua circulante por el tubo central, abierto en el sentido del flujo, genera una pérdida de presión respecto del cuerpo que lo rodea, que a su vez está abierto al medio ambiente.

Análogamente, es posible pensar en una turbina instalada dentro de una nueva carcasa. La función de esta segunda tubuladura, es la de evitar la dispersión del flujo aguas abajo, conduciendo el flujo libre hacia el final de la turbina. El efecto Venturi provoca una depresión aguas abajo, a la salida de la turbina, que se traduce en una succión sobre la entrada, la que disgrega el "tapón", y conseguiría una mayor velocidad de paso por la turbina. La consecuencia de estos hechos es el aumento de la producción de energía, sabiendo que no podrán sobrepasarse los límites de diseño.

### 3. Metodología

El objetivo es, en primer término, mejorar la eficiencia de turbinas hidráulicas sumergidas, y montadas en una pieza de geometría simple, mediante la aplicación de este efecto. Para ello se relevó la información correspondiente al diseño de turbinas y la simulación del diseño. A diferencia del montaje tradicional presentado en la Figura 2, se propuso estudiar la factibilidad de utilizar una turbina de eje co-lineal al flujo. Así se encontró una variante diseñada por Tesla, Figura 5

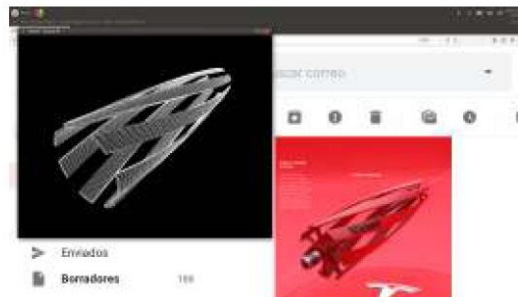


Figura 4 – Variante de turbina analizada

Por lo que el montaje a del caso de estudio está entonces representado por la Figura 5



Figura 5 – Caso de estudio, Caño de alcantarilla y turbina Gorlov horizontal

Las simulaciones se realizarán en FreeFem++, (Open Source software) entorno de desarrollo integrado de alto nivel (IDE), para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE), en 2D y 3D, mediante elementos finitos. La simulación contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado (mesh generator), y visualizadores propios. Como





<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

visualizador alternativo externo se utilizó Paraview (OpenSource). Presentamos una estrategia para calcular el movimiento de cuerpos rígidos en un fluido, basado en principios simples. Ilustra cómo se pueden simular fenómenos complejos directamente con el uso de los solvers de freefem++ [2, 5].

Se utilizará un enfoque conforme (en vez del método Euleriano), en donde el dominio ocupado por el fluido está cubierto por un mallado no estructurado, dado que para una microturbina el movimiento del fluido puede seguirse sin grandes deformaciones y de que no se trata de un cuerpo flotante [1, 2]. Se incluirá una estrategia de penalidad basada en término penal  $L^2$ , usado para prescribir un valor (ej.  $U$ ) para la velocidad dentro de una parte del dominio, simplemente se adiciona un término a la formulación variacional,  $\int (v - U) \cdot v$ , con  $v$  test-function [1]. Suponemos que el dominio  $\Omega$  (2D o 3D) se llena con un fluido newtoniano de densidad  $\rho$ , viscosidad  $\eta$ , viscosidad dinámica  $\nu$ , estando el proceso gobernado por la ecuación de Navier-Stokes [3, 4]

$$\nu = \eta/\rho \quad (1)$$

$$v_t + v \cdot \nabla v - \nu \nabla^2 v + \nabla p = a_{ext} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (3)$$

Si el flujo es de alta viscosidad dinámica, como por ejemplo gasolina, petróleo o aceite en el modelo anterior el término convectivo puede ser despreciado y se obtiene el flujo de Stokes [3]:

$$v_t - \nu \nabla^2 v + \nabla p = a_{ext} \quad (4)$$

La presión tiene que ser considerada como una variable no relacionada a ninguna ecuación constitutiva. Su presencia, en la ecuación de Navier-Stokes, tiene el propósito de introducir un grado de libertad adicional, necesitado para satisfacer un auto-ajuste instantáneo, actuando como un multiplicador de Lagrange de la restricción de incompresibilidad, y así, generando un acoplamiento entre la velocidad, y la presión desconocidos.

Se busca aplicar esta formulación a un problema de rotación de un cuerpo rígido,  $O$ , en este caso la microturbina, que representa un obstáculo que sigue un movimiento newtoniano en torno a un eje sin fricción, esto es,

$$\Omega/O = \Omega/O_{(t)} \quad (5)$$

esto se reduce a una ecuación en la velocidad angular ( $\omega$ ) entorno a un eje (o un punto en el caso 2D). Estas ecuaciones son acopladas a fuerzas hidrodinámicas que ejerce el fluido sobre el sólido. Finalmente, la viscosidad impone condiciones de no deslizamiento en el contorno de  $O$  (microturbina): la velocidad del lado del fluido es igual a la velocidad del lado rígido. Tratándose de un fluido newtoniano en torno de un proceso dinámico se considerará el tensor de Cauchy ( $\sigma$ ) y el de deformación linealmente relacionados, la forma compacta de escribir la relación velocidad de tensión- deformación es mediante la ley de Stokes [3]:

$$\sigma = -pI + 2\eta \nabla^S v \quad (6)$$

Donde

$$\nabla^S = 1/2(\nabla^T + \nabla) \quad (7)$$

Las condiciones de contorno son las usuales para flujos a través de un obstáculo,

$$v = v_\Gamma \quad (8)$$

en el contorno  $\Gamma$ ; y salida libre de fluido en la cara del lado trasero de la turbina se planteará con condiciones de contorno de Neumann. En este sector se considera de tracción cero, esto es:

$$\sigma \cdot n = -pn + \nu(n \cdot \nabla)v = 0 \quad (9)$$

Por supuesto para los álabes de la turbina se cumple que  $\sigma \cdot n \neq 0$ . Por ser un objeto móvil en un fluido incompresible la tensión ( $\sigma$ ) debe calcularse en cada paso de la simulación. Numéricamente la fuerza normal será

$$F_N = -p + 2\nu \partial v_n / \partial n = 0 \quad (10)$$

$$F_\tau = \nu(\partial v_\tau / \partial n + \partial v_n / \partial \tau) \quad (11)$$



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

con  $\tau$  vector tangencial, de acuerdo a las condiciones de contorno planteadas para la velocidad  $\partial v_n / \partial n = 0$ .

Para tomar en cuenta las fuerzas hidrodinámicas se agregarán condiciones de acoplamiento en las que se calcula el momento ejercido por el fluido en la turbina

$$v = \omega \times (r - r_0) \quad (12)$$

$$I(d\omega / dt) = - \int ((r - r_0) \times \sigma) \cdot n \quad (13)$$

Siendo  $I$ , el momento de inercia, realizándose la integración sobre el área de la microturbina. Para que el planteo 3D sea consistente desde un punto de vista conceptual el rendimiento óptimo de turbina se conseguirá para el diseño que minimice la fuerza de fricción y evite la acumulación de líneas de corriente (o distribución irregular). Para el cálculo de la fuerza de fricción se busca integrar la fuerza en toda el área de la microturbina calculando el gradiente de la velocidad en dirección normal y tangencial

$$F \sim v (\partial v_n / \partial n + \partial v_n / \partial \tau) \quad (14)$$

#### 4. RESULTADOS

Cabe destacar que, en ejecuciones previas, fueron ajustándose tanto el espaciado entre la carcasa y la turbina, como las longitudes de los bordes de ingreso, y egreso. Así, y utilizando los conceptos mencionados, se realizaron simulaciones donde se agregó la tubuladura a una turbina std. Los resultados arrojaron que, en efecto se logra disminuir la presión a la entrada de la turbina, si se monta sobre una tubuladura de geometría simple, Figura 6.

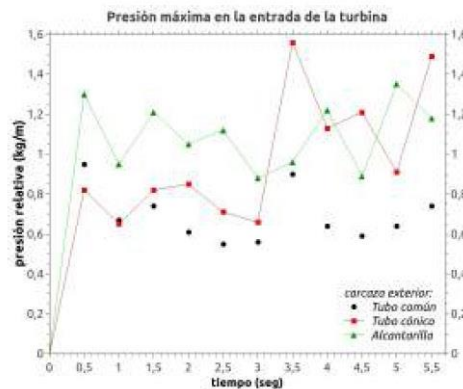


Figura 6 – Comparativa de presiones según el montaje

#### 5. CONCLUSIONES

La conclusión es que el montaje de la turbina dentro de un cuerpo adecuado mejora su eficiencia rompe con el efecto "tapón", disminuyendo la presión a la entrada, lo que implica que se ha logrado aumentar la velocidad en la turbina. Cabe destacar que no es posible aumentar el rendimiento absoluto de la turbina, sino su eficiencia, o rendimiento relativo, aunque disminuya la velocidad del curso de agua.

Dado que el objetivo es, en primer lugar, comprobar si el efecto Venturi es capaz de mejorar su eficiencia, queda abierta una nueva línea de investigación orientada hacia el diseño y modelización. En caso de requerir aliviar el costo computacional en la simulación 3D, se integrará un algoritmo de proyección como método de penalidad para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes no estacionarias. Debido a la presencia del término convectivo no lineal, y no simétrico, en la ecuación de momentos, en flujos de alto Reynolds aparecen problemas de estabilidad numérica. Tal es el caso del flujo en un río, ya que domina la convección, y para este problema, la formulación estándar Galerkin es inestable. Las técnicas de estabilización, tales como SUPG (Streamline-Upwind-Petrov-Galerkin), GLS (Galerkin Least-Squares), SGS (Sub-Grid Scale), o LS (Least-Squares), deben usarse, para obtener soluciones significativas mediante elementos finitos, en flujos de este tipo.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

Es común en dinámica de fluido computacional (CFD), proveer una instantánea de un campo de flujo, dibujando una familia de líneas de corriente (curvas a  $\psi$  constante y  $V$  tangente). En el contexto de elementos finitos, los contornos de líneas de corriente (con intervalos especificados en  $\psi$ , entre pares de líneas de corriente vecinas), son obtenidas integrando numéricamente, a lo largo de los lados de los elementos [3,5].

Además, se realizará un relevamiento para la evaluación económica para la implementación de la propuesta. Por otro lado, los costos de energía han aumentado en estos últimos años, lo que permite proponer soluciones con períodos de amortización aceptables.

## 6. REFERENCIAS

- [1] S. del Pino, B. Maury; 2D/3D turbine simulations in freefem ++, PROCEEDINGS of Numerical Analysis and Scientific Computing for PDEs and Their Challenging Applications, CIMNE, Barcelona, Spain 2007.
- [2] A. Lefebvre; Fluid-particle simulations with freefem++, ESAIM: PROCEEDINGS, July 2007, Vol. 18, pp120 -132.
- [3] Jean Donea and Antonio Huerta, Finite Element Method for Flow Problems, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [4] O. C. Zienkiewics and R. L. Taylor, The Finite Element Method, Vol3, Fluid Dynamics, Ed. Butterworth-Heinmann, 5th edición, 2000.
- [5] Y. Achdou, J.L. Guermond; Convergence Analysis of a finite element projection/Lagrange-Galerkin method for the incompressible Navier Stokes equations, SIAM J. Numer. Anal. 37 (2000), no. 3, 799–826.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

04/02/2020

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas

**Autores:**  
 Mg. Eterovic, Jorge E. (eterovic@unlam.edu.ar)  
 Mg. Fauroux, Luis E.  
 Lic. Degastani, Omar J.  
 Lic. González, Ricardo

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Resumen

El efecto Venturi provoca una depresión aguas abajo, a la salida de la turbina, que se traduce en una succión en la turbina. Un número importante de fenómenos en mecánica de fluidos se describen mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, que establecen los efectos dinámicos de fuerzas externas aplicadas y fuerzas internas de un fluido que se asume Newtoniano. El resultado esperado es lograr un aumento en la velocidad dentro de la turbina, y por ende una optimización respecto de la configuración inicial.

*Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas*

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Micro turbinas hidráulicas

Figura 1 – 3D Micro Turbina de 0.8 kW  
 Figura 2 – 3D Micro Turbina en operación

*Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas*

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Especificaciones de la micro turbina de referencia

Datos	Parámetros técnicos
generador de potencia nominal	0.8KW
generador de potencia de salida máximo	12KW
generador de potencia Real	Re: Curva de potencia Cuadro
objetivo actual velocidad	0.5 m/s-2.5m/s
mínimo ancho de vía fluvial	No menos de 900mm
bajo nivel de agua	No menos de 500mm
la frecuencia y la tensión de salida	50/60Hz monofásico 110 V-220 V*
la capacidad del inversor	monofásico 100V-500VA
peso del cuerpo principal de la turbina y tamaño	37 kg; W800mm x D820mm x H1450mm
voltaje de la batería	48 V
caja de control de potencia de salida	adaptado con 1 o 2
peso de la caja de Control y tamaño	17 kg; W310mm x D455mm x H205mm

*Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas*

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Efecto Venturi

Figura 3 – Diagrama del efecto

*Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas*

VICRIM I CAITE  
 al presidente de la comisión de evaluación de proyectos de investigación y desarrollo científico y tecnológico de la UNLaM  
 10 al 12 de Octubre TUCUMÁN, 2019

### Propuesta

Figura 4 – Caso de estudio, turbina sumergida

*Aplicación teórica del efecto Venturi en micro turbinas hidráulicas*



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

04/02/2020

**Metodología**

- Se asume una superficie cerrada y suficientemente regular (Lipschitz)
 
$$v_x + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v - \gamma \nabla(\nabla \cdot v) + \nabla p = b$$
- En un continuo incompresible la velocidad de cambio de la densidad de masa siguiendo el movimiento es cero,  $\nabla \cdot v = 0$ .
 
$$v_x + (v \cdot \nabla)v - \gamma \nabla^2 v + \nabla p = b$$
- El problema de Navier-Stokes debe completarse con condiciones iniciales, y de contorno, que típicamente permiten asignar un valor de velocidad,  $v_0$ , a una porción del contorno,  $\Gamma_0 : v(x,t) = v_0(x,t)$
- La tracción del contorno  $t$ , en la porción complementaria  $\Gamma_1 : n \cdot \sigma(x,t) = t(x,t)$

*Aplicación de la ley de Navier-Stokes en geometrías arbitrarias*

**Navier - Stokes**

- En un fluido que obedece a la ley de Stokes, se cumple que:
 
$$n \cdot \sigma = -pn + 2\gamma n \cdot \nabla^2 v = t \text{ (tracción en el contorno)}$$
- En 2D, y con referencia a un sistema cartesiano local  $(\eta, \tau)$ , se obtienen dos ecuaciones:
 
$$-p + 2\gamma(\partial^2 v_x / \partial \eta^2) = t_x$$
- Siendo el esfuerzo normal aplicado,
 
$$\gamma(\partial^2 v_x / \partial \eta^2 + \partial^2 v_x / \partial \tau^2) = t_x$$
- En ausencia de fuerza de volumen queda:  $v_x + (v \cdot \nabla)v - (1/R\epsilon)\nabla^2 v + \nabla p = 0$
- Por último, la función escalar de corriente,  $\psi(x, y)$ , se escribe como
 
$$\psi(x, y) - \psi_0 = \int_0^x \nabla \psi \cdot dx = \int_0^x [v \times dx]$$

*Aplicación de la ley de Navier-Stokes en geometrías arbitrarias*

**Navier - Stokes**

Debido a la presencia del término convectivo no lineal, y no simétrico, en la ecuación de momentos, en flujos de alto Reynolds aparecen problemas de estabilidad numérica. Tal es el caso del flujo en un río, ya que domina la convección, y para este problema, la formulación estándar Galerkin es inestable. Las técnicas de estabilización, tales como SUPG (Streamline-Upwind-Petrov-Galerkin), GLS (Galerkin Least-Squares), SGS (Sub-Grid Scale), o LS (Least-Squares), deben usarse, para obtener soluciones significativas mediante elementos finitos, en flujos de este tipo.

Otra fuente de dificultad numérica, es la condición de incompresibilidad. La ecuación de continuidad, para un fluido incompresible, consiste en una restricción en el campo de velocidad, libre de divergencia. Luego, la presión tiene que ser considerada como una variable no relacionada a ninguna ecuación constitutiva. Su presencia, en la ecuación de Navier-Stokes, tiene el propósito de introducir un grado de libertad adicional, necesitado para satisfacer un auto-ajuste instantáneo, actuando como un multiplicador de Lagrange de la restricción de incompresibilidad, y así, generando un acoplamiento entre la velocidad, y la presión desconocidos.

*Aplicación de la ley de Navier-Stokes en geometrías arbitrarias*

**Simulación**

Las simulaciones se realizaron en FreeFem++, (Open Source software) entorno de desarrollo integrado de alto nivel (IDE), para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE), en 2D y 3D, mediante elementos finitos. La simulación contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado (mesh generator), y visualizadores propios. Como visualizador alternativo externo se utilizó Paraview (OpenSource).

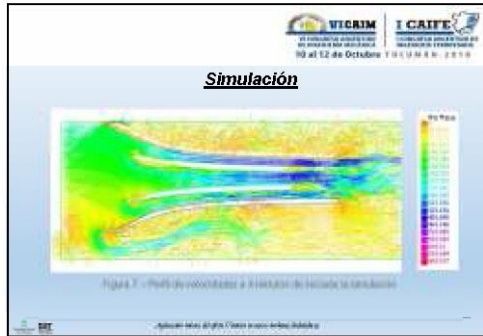
*Aplicación de la ley de Navier-Stokes en geometrías arbitrarias*





<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

04/02/2020



- 
- La evolución de la velocidad muestra que efectivamente, la colocación de una segunda carcasa aumenta la velocidad en la carcasa interior de la turbina, lo que implica un aumento del rendimiento.
  - Es posible maximizar el rendimiento, y aunque disminuya la velocidad del curso de agua, el rendimiento no decae sensiblemente respecto del óptimo en esas condiciones.
  - Dado que el objetivo, desarrollar un modelo de optimización,
  - Relevantar la evaluación económica para la implementación de la propuesta.
  - Por otro lado, en virtud de que los costos de energía han aumentado en estos últimos años, se estiman periodos de amortización aceptables.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



**CAIQ2019**  
CENTENARIO FIQ - Santa Fe  
4 al 7 Agosto de 2019

**X Congreso Argentino de Ingeniería Química**

## Simulación del Efecto Venturi en una Micro Turbina Hidráulica montada en gabinetes de Geometría Simple

Autores: Fauroux L. E. (lfauroux@unlam.edu.ar), Rinaldi, P., Eterovic, J. E.

Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas - (Universidad Nacional de La Matanza)  
Florencio Varela 1905 (1754) San Justo - Argentina

### Resumen:

Todo objeto que se interponga a un flujo genera turbulencia, la que actúa como un efecto "tapón" para el ingreso del fluido a la turbina. La incorporación de una segunda carcasa produciría un efecto Venturi, provocando una depresión aguas abajo, la que se traduce en una succión dentro la turbina. Así se consigue un incremento en la velocidad de paso, y por ende su optimización. El beneficio de esta implementación es una mejor relación costo-beneficio en la producción de energía. Más allá que los costos para la adquisición de la energía han aumentado en estos últimos años, una propuesta de optimización debe ir acompañada también de un período de amortización aceptable.

**Modelado:** Las simulaciones fueron realizadas en FreeFem++, entorno de desarrollo integrado de alto nivel para resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en 2D y 3D mediante elementos finitos, contiene algoritmos de estabilización, generador de malla automatizado, y visualizadores propios. La Fig. (3) representa el diseño de una carcasa de turbina dentro de un tubo de alcantarilla.

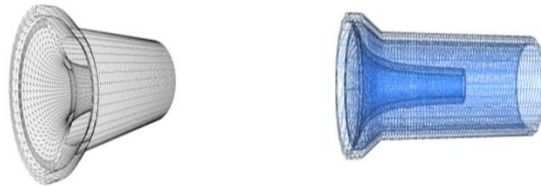


Fig. 3. Planteo de una turbina montada en un tubo de alcantarilla



Fig. 4(a). Turbina sin montaje de doble carcasa

Fig. 4(b). Montaje en caño de alcantarilla

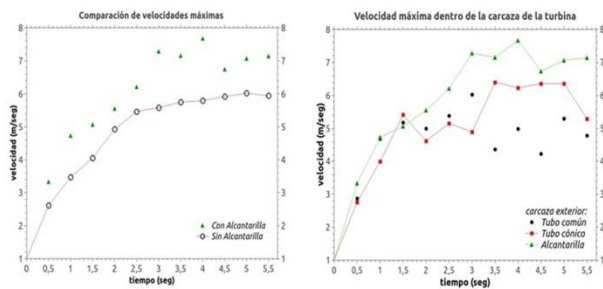


Fig. 5. Comparación de las velocidades máximas según el montaje

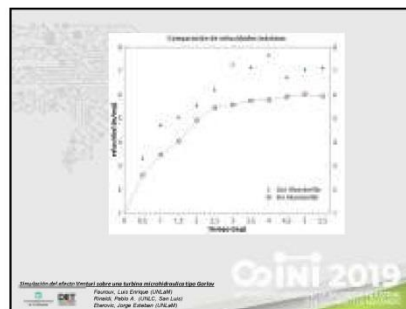
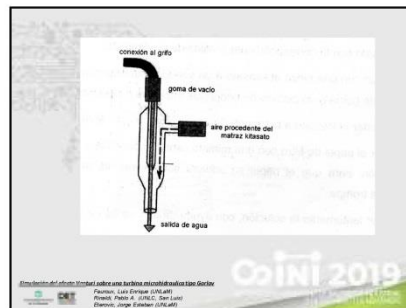
### Resultados:

El perfil de velocidad inicial es lineal: desde 0 en el fondo a 1m/seg en la superficie, el recorrido completo es de 5 m. y una profundidad de 1.2m. Los resultados (ver Fig. 4) donde las velocidades inferiores se representan en color naranja (superior) y las altas en violeta (inferior), de 0 m/s a 7m/s. En general, se puede apreciar el beneficio del agregado de una segunda carcasa, y en particular una mejor respuesta del montaje sobre un caño de alcantarilla. La evolución de la velocidad (ver Fig 5), muestra que la colocación de una segunda carcasa aumenta la velocidad en el interior de una turbina, Se concluye que la colocación de una segunda carcasa es una metodología útil para maximizar el aprovechamiento de la velocidad de superficie, reduciendo las pérdidas por baja en la velocidad del curso de agua.



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

4/2/2020

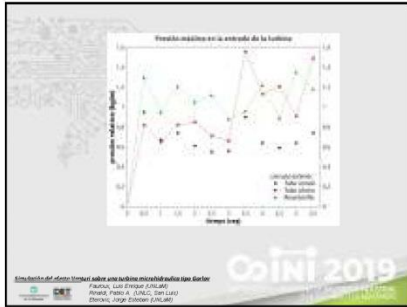






<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

4/2/2020



**Ecuaciones: velocidad, contorno, fuerzas, inercia, fricción.**

$v = \eta/\rho$	(1)
$v_r + v \cdot \nabla v - \nu \nabla^2 v + \nabla p = \rho_{ext}$	(2)
$\nabla \cdot v = 0$	(3)
$v = \nabla \psi + \nabla \varphi = \rho_{ext}$	(4)
$\Delta(\psi) = \Delta(\varphi)/\rho_{ext}$	(5)
$\sigma = -p + 2\nu \nabla^2 v$	(6)
$v = \nabla \varphi$	(7)
$\sigma \cdot n = -p n + \nu(\nabla \cdot \nabla)v = 0$	(8)
$F_B = -p + 2\nu \partial_{nn}/\partial n = 0$	(9)
$F_s = \nu(\partial_{\theta\theta}/\partial \theta + \partial_{\theta\theta}/\partial \theta)$	(10)
$v = \omega \times (r - r_c)$	(11)
$I(d\omega/dt) = -\int ((r - r_c) \times \sigma) \cdot n$	(12)
$F = \nu(\partial_{\theta\theta}/\partial \theta + \partial_{\theta\theta}/\partial \theta)$	(13)

Evolución de la velocidad en la entrada de la turbina a lo largo del tiempo

COINI 2019

Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM  
 Facultad de Ingeniería (UNLaM)  
 Avenida Pablo A. SANCHEZ, 2800 La Plata  
 Dirección: Jorge Enriquez (jorge@unlam.edu.ar)



**RESULTADOS y CONCLUSIONES**

- La evolución de la velocidad, muestra que efectivamente, la colocación de una segunda carcasa aumenta la velocidad en la carcasa interior de la turbina, lo que implica un aumento del rendimiento.
- Los costos de energía han aumentado en estos últimos años, lo que permite proponer soluciones con períodos de amortización aceptables.
- Es de destacar que este proyecto se desarrolló en conjunto con un barrio cerrado, en el que ya se habían materializado otras propuestas respetuosas del medio ambiente, como la gestión, tratamiento, y mantenimiento de agua pluvial en lagunas artificiales.
- Se considerarán aquellas donde el caudal fluvial pueda verse afectado por fenómenos como las sudestadas, con la intención de mantener una generación sostenida de energía.
- Se propone ofrecer, en primera instancia, entonces, los resultados a administraciones de barrios cerrados, y clubes ribereños, que cumplan con estas características.
- Este tipo de locaciones poseen necesidades nocturnas, cuyos servicios podrían ser sostenidos por la producción de turbinas de baja potencia, dependiendo su número de la cantidad del suministro requerido, y el período de amortización dependerá del balance de costos.
- Para estas entidades es importante poder disponer de fuentes alternativas de energía, con el objeto de disminuir la demanda sobre el suministro de red, y cumplir con las normas ambientales vigentes.

Evolución de la velocidad en la entrada de la turbina a lo largo del tiempo

COINI 2019

Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM  
 Facultad de Ingeniería (UNLaM)  
 Avenida Pablo A. SANCHEZ, 2800 La Plata  
 Dirección: Jorge Enriquez (jorge@unlam.edu.ar)

**MUCHAS GRACIAS**

[jfauroux@unlam.edu.ar](mailto:jfauroux@unlam.edu.ar)

COINI 2019

Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM  
 Facultad de Ingeniería (UNLaM)  
 Avenida Pablo A. SANCHEZ, 2800 La Plata  
 Dirección: Jorge Enriquez (jorge@unlam.edu.ar)



10 al 12 de Octubre

Organizan



FoDAMI



Certificamos que

**JORGE ESTEBAN ETEROVIC, LUIS E. FAUROUX, OMAR J. DEGAETANI, RICARDO GONZÁLEZ**

han presentado el trabajo titulado:

**“ APLICACIÓN TEORICA DEL EFECTO VENTURI EN MICRO TURBINAS HIDRAULICAS ”  
ÁREA TEMÁTICA: E - SISTEMAS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS**

San Miguel de Tucumán, 12 de Octubre de 2018

Ing. Alberto Romeo  
Co-Presidente  
VICAIM 2018 – I CAIFE 2018  
Fo.D.A.M.I.

Ing. Fernando Flores Blasco  
Co-Presidente  
VI CAIM 2018 – I CAIFE 2018  
Fac. de Cs. Exactas y Tecnología. UNT

Ing. Ricardo Amé  
Presidente Fo.D.A.M.I.

Ing. Miguel Angel Cabrera  
Decano  
Fac. de Cs. Exactas y Tecnología  
U.N.T.

Código	FPI-009
Objeto	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
Usuario	Director de proyecto de investigación
Autor	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
Versión	5
Vigencia	03/9/2019



**Congreso Argentino  
de Ingeniería Química**


Congreso Internacional "100 años de Ingeniería Química en Argentina y Latinoamérica"

**CERTIFICADO**  
Otorgado a:

**Luis Fauroux**

**Por su participación en el CAIQ2019 - X Congreso Argentino de Ingeniería Química**

Santa Fe - 4 al 7 de Agosto de 2019

  
**Dr. Carlos Apesteguía**  
Presidente Comité Científico CAIQ2019

  
**Ing. Oscar Pagola**  
Presidente AAIQ  
Presidente Comité Organizador CAIQ2019



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



# OSINI 2019

XIº CONGRESO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

## CERTIFICADO DE EXPOSITOR

Fauroux, Luis Enrique

Ha expuesto su trabajo “Simulación del efecto Venturi sobre una microturbina hidráulica tipo Gorlov, (Código: CO19-A01)”, en el marco del XIIº Congreso Nacional de Ingeniería Industrial desarrollado los días 31 de octubre y 1º de Noviembre en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Cruz, Río Gallegos.

DR. INC. MARIO LURBE  
PRESIDENTE COINI 2019

ESP. ARO. MIGUEL RISETTO  
PRESIDENTE ACCOI

LIC. SEBASTIÁN PUIG  
DECANO UINFRSC

<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

- Anexo II:
  - FPI-013: Evaluación de alumnos integrantes. (si corresponde)
  - FPI-014: Comprobante de liquidación y rendición de viáticos. (si corresponde)
  - FPI-015: Rendición de gastos del proyecto de investigación acompañado de las hojas foliadas con los comprobantes de gastos.
  - FPI-035: Formulario de reasignación de fondos en Presupuesto.
- Anexo III: Alta patrimonial de los bienes adquiridos con presupuesto del proyecto (FPI 017)
- Nota justificando baja de integrantes del equipo de investigación.

.....

Firma del Director

Mg. Eterovic, Jorge E.

Lugar y fecha : San Justo, 01 de febrero de 2020



<b>Código</b>	FPI-009
<b>Objeto</b>	Guía de elaboración de Informe final de proyecto
<b>Usuario</b>	Director de proyecto de investigación
<b>Autor</b>	Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNLaM
<b>Versión</b>	5
<b>Vigencia</b>	03/9/2019

- Presentar una copia impresa firmada del presente documento junto con los Anexos, y enviar todo en archivo PDF por correo electrónico a la Secretaría de Investigación Departamental. **Límite de entrega: 28 de febrero de 2020**