

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN LA  
INDUSTRIA OIL&GAS EN TUBERÍAS DE FLUJO DE AGUA PARA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.**

**CHRISTIAN MARIN DUCUARA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN LA  
INDUSTRIA OIL&GAS EN TUBERÍAS DE FLUJO DE AGUA PARA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE.**

**CHRISTIAN MARÍN DUCUARA**

**Trabajo de Grado para optar el título de Especialista en Producción de  
Hidrocarburos**

**DIRECTOR**

**JOHN ALEXANDER LEON**

**M.Sc en ingeniería de hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BOGOTÁ D.C.**

**2022**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	8
1. OBJETIVOS.....	10
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
2. GENERACIÓN A PARTIR DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA .....	11
2.1 TECNOLOGÍA HIDROKINÉTICA.....	11
2.2 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA A POTENCIA ELÉCTRICA ÚTIL .....	12
2.3 MODELOS Y CONFIGURACIONES DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS .....	13
2.4 PARÁMETROS Y VARIABLES.....	16
2.4.1 ESTADOS DE FLUJO.....	16
2.4.2 PÉRDIDAS DE CARGA.....	17
2.4.3 ÁREA DE BARRIDO.....	18
2.4.4 COEFICIENTE DE POTENCIA.....	18
2.4.5 DISEÑO ÓPTIMO DEL ALABE.....	18
3. PANORAMA GENERAL SOBRE ESTUDIOS, APLICACIONES Y AVANCES EN EL MUNDO.....	20
4. POTENCIAL HIDROKINÉTICO EN TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (ACUEDUCTOS) .....	23
4.1 LUCID ENERGY .....	23
4.1.1 LUCIDPIPE.....	24
4.1.2 PROYECTO PILOTO EN RIVERSIDE, CALIFORNIA.....	25
4.1.3 PROYECTO EN PORTLAND, OREGON.....	25
4.1.3.1 NORMATIVIDAD.....	26
4.1.3.2 CAPACIDAD DE GENERACIÓN.....	26
4.1.4 CAPACIDAD DE POTENCIA.....	27

5. APLICACIÓN TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN INDUSTRIA OIL&GAS.....	28
5.1 HISTORIA DE INYECCIÓN EN EL CAMPO.....	28
5.1.1 TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.....	29
5.1.2 PAD DE INYECCIÓN.....	30
5.2 TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN LÍNEAS DE TRANSFERENCIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN A PAD DE INYECCIÓN.....	31
5.3 CÁLCULO DE POTENCIA PARA EL SISTEMA PLANTEADO .....	33
5.4 LUCIDPIPE EN LA INDUSTRIA OIL&GAS.....	35
6. CONCLUSIONES .....	37
7. RECOMENDACIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39

## LISA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Layout de turbina hidrocinetica en un canal y sus componentes principales.....	12
Figura 2. Transformación energía cinética a energía eléctrica útil.....	13
Figura 3. Clasificación turbinas hidrocinéticas. ....	14
Figura 4. Turbinas de eje horizontal.....	15
Figura 5. Diseño turbina tipo Darrieus y Gorlov. ....	16
Figura 6. Fórmula área de barrido para tres tipos de turbinas. ....	18
Figura 7. Turbina tipo Gorlov patentada por Lucid Energy. ....	24
Figura 8. Distribución básica de tres turbinas Lucid Pipe. ....	26
Figura 9. Diámetros de tuberías, capacidad y flujo mínimo requerido para uso de turbinas Lucid Pipe. ....	27
Figura 10. Historia de inyección de agua en Campo Rubiales. ....	29
Figura 11. Bombas centrifugas para inyección de agua. ....	30
Figura 12. Layout instalación de turbinas hidrocinéticas.....	31
Figura 13. Recorrido línea de distribución de agua seleccionada.....	32
Figura 14. Caudal, diámetro y velocidad de flujo en una tubería. ....	34
Figura 15. Datos proporcionados por la empresa Lucid Energy para sus turbinas disponibles.....	36

## RESUMEN

**TITULO:** ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN LA INDUSTRIA OIL&GAS EN TUBERIAS DE FLUJO DE AGUA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE\*.

**AUTORES:** CHRISTIAN MARIN DUCUARA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Turbinas hidrocínéticas, energía eléctrica, generación, energía hidráulica, energía cinética, agua de producción, inyección de agua.

### DESCRIPCIÓN

La presente monografía contempla un panorama general sobre estudios, aplicaciones y avances en tecnología de sistemas hidrocínéticos en Colombia y en el mundo, Con base a lo anterior se estudiará el funcionamiento teórico de una turbina hidrocínética, clasificación, factores críticos para un diseño de un sistema, las aplicaciones y discusiones en otras industrias para finalmente llegar a una contextualización en la industria OIL&GAS.

La energía cinética de una corriente de agua es totalmente aprovechable mediante una configuración básica de turbinas generadoras ubicadas en lugares específicos en un canal, río o tubería de distribución de agua, ahora bien, la industria Oil&Gas a nivel global produce altas tasas de agua de producción, las cuales circulan minuto a minuto en tuberías de gran diámetro y, generalmente, grandes distancias hasta alcanzar los Pads de inyección; allí diversos tipos de bombas aumentan la presión para lograr desplazar el fluido hasta el yacimiento y lograr proporcionar una disposición final. El tramo comprendido entre facilidades de producción y el pad de inyección es donde se plantea la posible adecuación de los sistemas hidrocínéticos

Luego de un análisis y una revisión bibliográfica se logró dar un aproximado de la capacidad de potencia generada por una turbina instalada en un campo petrolífero en Colombia, además de llegar a una selección de turbina teniendo en cuenta las aplicaciones hidrocínéticas en otras industrias y la disponibilidad en el mercado.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Especialización en producción de Hidrocarburos. Director John Alexander León M. Sc en ingeniería de hidrocarburos

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPLEMENTATION OF HDROKINETIC TURBINES ANALYSIS IN OIL & GAS INDUSTRY IN WATER FLOW PIPES FOR THE RENEWABLE ENERGY GENERATION\*.

**AUTHORS:** CHRISTIAN MARIN DUCUARA\*\*.

**WORDS KEY:** Hydrokinetic turbines, electrical energy, hydraulic energy, kinetic energy, production water, water injection.

### DESCRIPTION

This monograph provides an overview of studies, applications and advances in hydrokinetic system technology in Colombia and in the world. Based on the above, the theoretical operation of a hydrokinetic turbine, classification, critical factors for a system design, applications and discussions in other industries will be studied to finally reach contextualization in the OIL&GAS industry.

The kinetic energy of a water current is fully exploitable through a basic configuration of generating turbines located in specific places in a canal, river or water distribution pipe, however, the Oil&Gas industry globally produces high rates of production water, which circulate minute by minute in large diameter pipes and, generally, great distances until reach the injection pads, where various types of pumps increase the pressure to move the fluid to the reservoir and thus give it a final disposal. The section between the production facilities and the injection pad is where the possible adaptation of the hydrokinetic systems is considered.

After an analysis and bibliographic review, it was possible to give an approximate of the power capacity generated by a turbine installed in a Colombian oil field and a turbine selection taking into account the hydrokinetic applications in other industries and the market availability.

---

\* Graduate Thesis.

\*\* Physicochemical Engineering College. Petroleum Engineering School Specialization in Hydrocarbon production. Advisor: M. Sc John Alexander Leon.

## INTRODUCCIÓN

Diariamente la industria OIL&GAS, en Colombia y el mundo, genera altos volúmenes de agua de producción, también denominada de formación, en campos petrolíferos donde la relación agua petróleo varía a nivel mundial entre 3 y 5 barriles de agua generados por cada barril de crudo producido, incluso alcanzando valores entre 10 y 14, para campos maduros<sup>1</sup>. Para el 2018, esta industria originó una alta cantidad de agua en la fase de extracción, aproximadamente, más de 300 millones de barriles de agua se reportaron diariamente en el mundo<sup>2</sup>. Las compañías petroleras realizan diferentes tareas con dicha agua para lograr darle una disposición final, donde se incluyen actividades como: reinyección para recobro mejorado, inyección como destino final y vertimientos a cuerpos de agua, todo lo anterior siguiendo una normatividad específica. Ahora bien, un gran porcentaje de esta agua es transportada en ductos hacia pads de inyección con el fin de cumplir el objetivo de realizar una inyección o disposición.

La energía hidrocínética del flujo de agua en ductos y tuberías es totalmente aprovechable mediante una configuración básica de una turbina generadora, sin necesidad de una presa o altos diferenciales de presión. Actualmente poco de este potencial ha sido desarrollado con precisión a nivel mundial, algunas industrias han realizado avances y aplicaciones con diferentes prototipos de turbinas y han puesto en marcha proyectos pilotos obteniendo cierta viabilidad bajo ciertas circunstancias.

La implementación de turbinas hidrocínéticas en tuberías de flujo de agua de producción podría llegar a ser un proyecto viable teniendo en cuenta la dependencia

---

<sup>1</sup> NABZAR, L. and DUPLAN, J. "Water in fuel production: Oil production and refining". Panorama 2011, IFP Energies, 2011.

<sup>2</sup> GARCÍA, J. CABARCAS, M. y HERRERA S.. "Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del caribe colombiano". El Reventón Energético, 15(2), 89-105, 2017.

de terceras empresas para el suministro de energía eléctrica, los grandes caudales de agua que diariamente circulan en tuberías y los bajos costos para la instalación, pues no requiere depósitos para almacenar el agua, además de los aspectos cotidianos como son el cambio climático y el aumento del requerimiento energético a nivel mundial.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis teórico de la implementación de turbinas hidrocínéticas en la industria OIL&GAS en tuberías de flujo de agua para generación de energía renovable.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir el procedimiento de operación de una turbina generadora y las condiciones requeridas para su funcionamiento en una línea de distribución de agua.
- Determinar las variables de mayor impacto para el funcionamiento de una turbina hidrocínética en un ambiente semejante a una línea de distribución de agua de producción.
- Realizar una revisión de artículos para asimilar los modelos, aplicaciones y resultados de turbinas hidrocínéticas en otras industrias
- Calcular un aproximado de la capacidad de generación de una turbina hidrocínética de acuerdo a un campo petrolero en Colombia como referencia.

## 2. GENERACIÓN A PARTIR DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA

### 2.1 TECNOLOGÍA HIDROKINÉTICA

La generación hidrocinetica utiliza la energía que se encuentra en una corriente de agua (ríos, ductos, canales, corrientes marinas) por medio de una configuración de turbinas y generadores ubicados estratégicamente para lograr una producción de electricidad<sup>3</sup>.

Los sistemas hidrocinéticos son un método de obtención de energía hidroeléctrica de “carga cero”, es decir no requieren grandes diferenciales de presión para adquirir energía eléctrica, tan solo basta con una corriente de agua; lo anterior evita grandes desafíos que requieren las hidroeléctricas convencionales como son los altos costos en obras civiles y la necesidad de una carga de energía potencial aceptable y explotable. Funciona de manera similar a una turbina eólica, sin embargo, tiene múltiples ventajas sobre ella como por ejemplo la capacidad de predecir la potencia generada en cierto periodo, el bajo impacto ambiental, el bajo costo de instalación y mantenimiento y esencialmente logra mayor concentración energética, esto debido a la densidad del agua<sup>4</sup>.

La potencia por unidad de área disponible en estas corrientes se puede calcular mediante la siguiente ecuación<sup>5</sup>:

---

<sup>3</sup> VERMAAK H. J., KUSAKANA K., and KOKO S. P., “Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.

<sup>4</sup> DINESH Kumar, SHIBAYAN Sarkar, A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 58, 2016, pages 796-813.

<sup>5</sup> GÜNEY M.S., KAYGUSUZ K., Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Pages 2996-3004,

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 C_p$$

Donde:

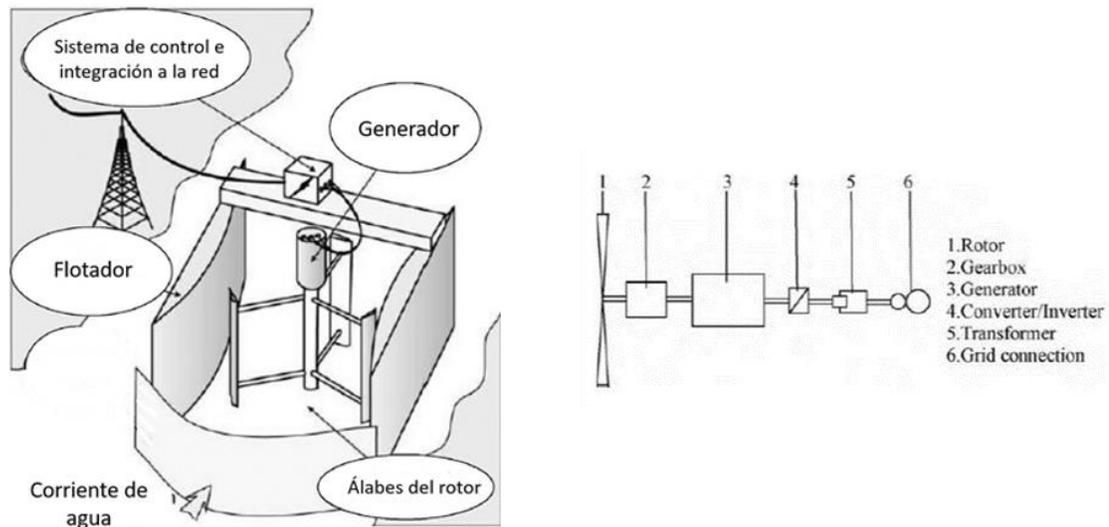
$\rho$ : Densidad del agua

$A$ : Área de barrido de la turbina

$V$ : Velocidad promedio de la corriente de agua

$C_p$ : Coeficiente de potencia

**Figura 1. Layout de turbina hidrocinetica en un canal y sus componentes principales.**



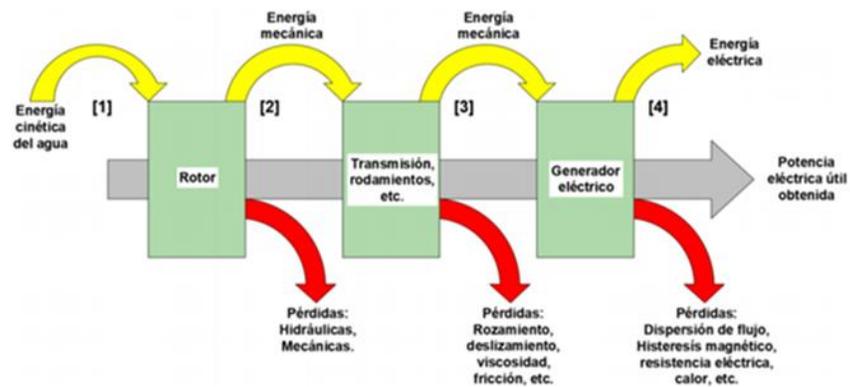
Fuente: A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential, Volume 113, 2019.

## 2.2 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA A POTENCIA ELÉCTRICA ÚTIL

Mediante la figura 2 se expone una explicación de la transformación energética. La energía cinética de la corriente de agua genera un movimiento en los alabes de la

turbina y su eje, transformando esta energía en energía mecánica. El generador acoplado a la turbina se encarga de transformar esta energía mecánica en eléctrica. Se deben considerar las pérdidas por fricción, velocidad, hidráulicas y mecánicas en el momento de generar un diseño aplicable a un sistema.

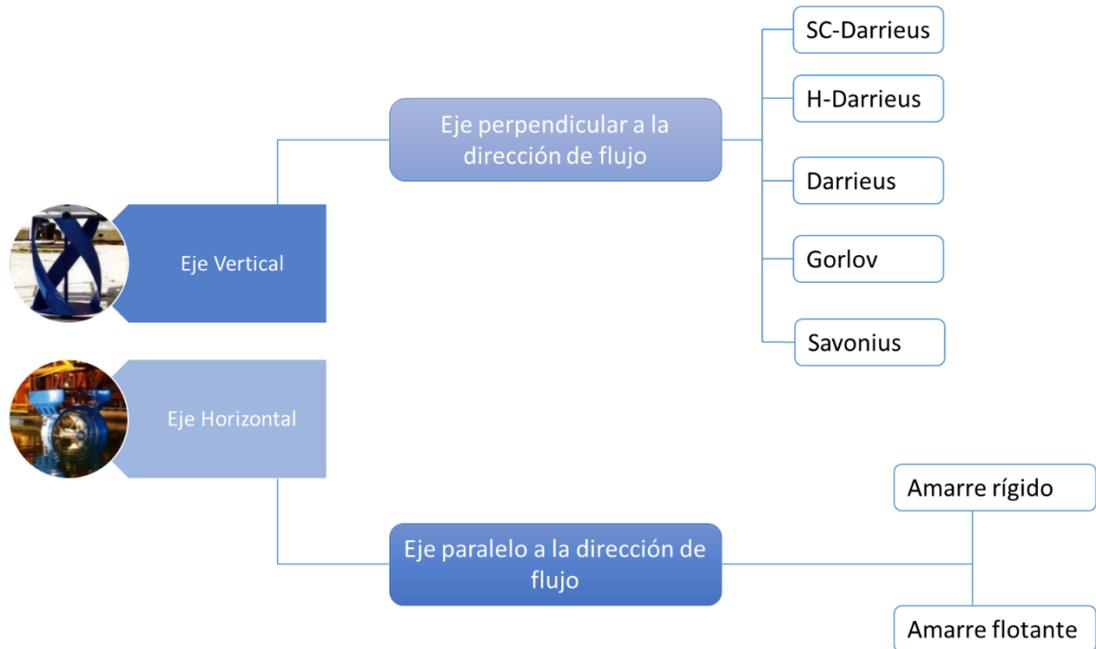
**Figura 2. Transformación energía cinética a energía eléctrica útil.**



### 2.3 MODELOS Y CONFIGURACIONES DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS

Una unidad hidroeléctrica básica consiste en una turbina y un generador. La mayoría de turbinas, basados en el principio de operación, pueden ser categorizadas en turbinas de reacción, turbinas de impulso o turbinas hidrocinéticas y a su vez, las turbinas hidrocinéticas pueden ser categorizadas según la orientación del eje de rotación con respecto a la dirección del flujo del agua de la siguiente manera

**Figura 3. Clasificación turbinas hidrocinéticas.**

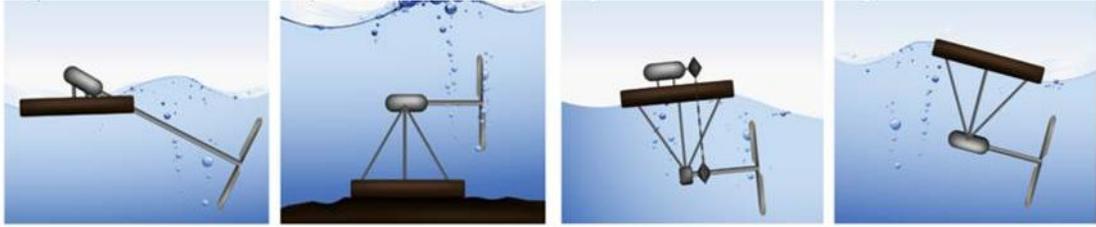


La mayoría de las turbinas hidrocinéticas son de eje horizontal donde el flujo es paralelo al eje, esto debido a que genera velocidades de rotación mucho más altas y por tanto una potencia de salida mayor. Este tipo de turbinas tienen un alto costo de manufactura por la forma de sus alabes que deben ser lo suficientemente rígida para soportar cualquier tipo de carga dinámica de la corriente sin llegar a sufrir alguna ruptura<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Ibid

**Figura 4. Turbinas de eje horizontal.**



Fuente. CARDONA-MANCILLA, Cristian, SIERRA DEL RÍO, Jorge, CHICARRIETA, Edwin, & HINCAPIÉ-ZULUAGA, Diego. Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3), 2018 p. 180-197.

La primera turbina de eje vertical fue diseñada por Darrieus en 1920, este sistema está configurado por una serie de hidroalas en forma de espadas verticales ubicadas entre un soporte superior e inferior, girando alrededor del eje perpendicular con respecto a la dirección de flujo<sup>7</sup>.

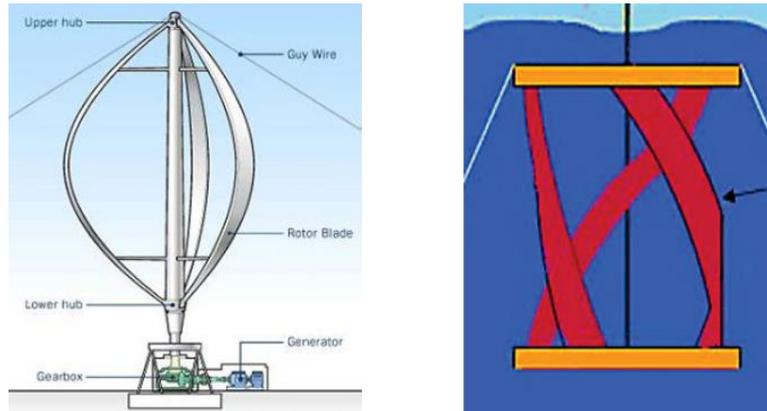
Las turbinas helicoidales fueron diseñadas por el investigador ruso Alexander Gorlov y consiste en una hélice helicoidal dentro de una estructura. Fueron creadas para dar solución a las vibraciones generadas por las turbinas Darrieus. En este tipo de turbinas el eje es perpendicular al flujo y logra capturar el movimiento del agua en todas las direcciones, incluso a bajas velocidades, siendo aprovechada la energía cinética con mayor eficiencia<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> SÁNCHEZ, Claudia. Turbinas hidrocínéticas una alternativa para generación eléctrica. 2016 2. 10.

<sup>8</sup>Ibid

**Figura 5. Diseño turbina tipo Darrieus y Gorlov.**



## 2.4 PARÁMETROS Y VARIABLES

**2.4.1 Estados de flujo.** El flujo en ductos, canales etc., está gobernado por efectos de la viscosidad y la gravedad con respecto a las fuerzas inerciales del flujo.

El efecto de la viscosidad genera que el flujo sea Laminar, Turbulento o transicional según su relación con la inercia. Con el número de Reynolds,  $Re$ , es posible definir el estado de un flujo, por medio de la relación de viscosidad del fluido y las fuerzas inerciales de este.

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un número adimensional utilizado en la mecánica de fluidos, en este se relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional<sup>9</sup>; y está determinado por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V_s D}{\mu}$$

---

<sup>9</sup> AVELLANEDA, MARCO TULLIO, Implementación del montaje experimental para determinar el comportamiento de un flujo mediante el experimento de Reynolds, 2016 pp 20

Donde:

$\rho$  Densidad del fluido

$V_s$  Velocidad característica del fluido

D Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido

$\mu$  Viscosidad dinámica del fluido

Para el caso específico de un flujo en tubería existen ciertos rangos para determinar el tipo de flujo:

$Re < 2300$  Flujo Laminar: las fuerzas de viscosidad son mayores que las fuerzas inerciales, por lo cual las partículas tienden a moverse en las líneas de corriente. El fluido lleva un movimiento ordenado siguiendo una línea de corriente.

$Re > 4000$  Flujo Turbulento: las fuerzas viscosas en comparación con las inerciales son más débiles, por lo tanto, las partículas presentan recorridos irregulares

$2000 < Re < 4000$  Flujo Transicional: Presenta flujos intermitentes entre laminar y turbulento<sup>10</sup>.

Mediante este cálculo se da a conocer como es la interacción del fluido al hacer contacto con los alabes del generador.

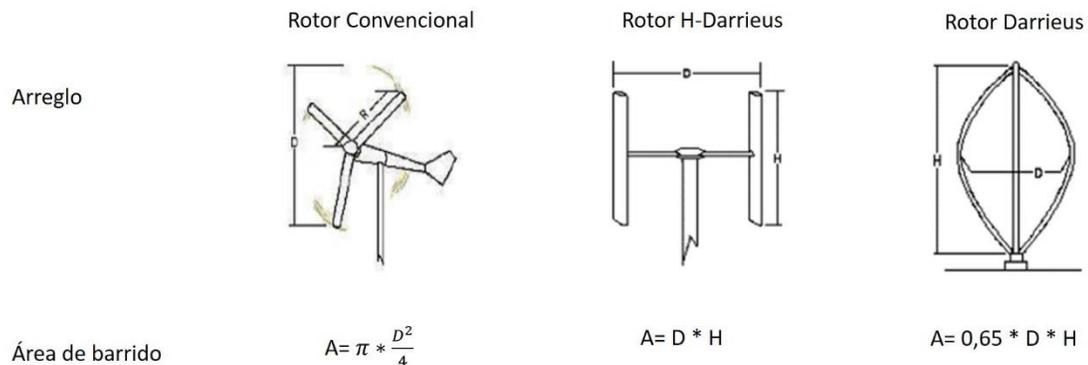
**2.4.2 Pérdidas de carga.** Estas pérdidas hacen referencia a las pérdidas de presión que se generan en el fluido debido al roce con las paredes del ducto y al roce entre partículas, más conocidas como pérdidas por fricción. Estas pérdidas se pueden dar a lo largo de la longitud de la tubería o por diferentes accesorios instalados para cambiar de dirección o modificar caudal de flujo.

---

<sup>10</sup> LLUGUAY DUCHI KLEVER ANGEL, Desarrollar un modelo CFD para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbomaquinaria hidráulica y laboratorio, 2016.

**2.4.3 Área de barrido.** Cuando se instala una turbina en un ducto, lo que se hace es interceptar una cierta cantidad de agua de producción de un área de tamaño A con el alabe de la turbina, esta se conoce como área de barrido. Esta área es propia para cada diseño y es calculada teniendo en cuenta diámetro y altura de la turbina<sup>11</sup>.

**Figura 6. Fórmula área de barrido para tres tipos de turbinas.**



Fuente: A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential, Volume 113, 2019.

**2.4.4 Coeficiente de potencia.** La energía del agua fluyente no se puede extraer en su totalidad debido a si el agua cediese toda su energía cinética tendría que detenerse, afectando el ciclo; por otro lado, existe una disipación de energía en el eje del rotor por fricción, arrastre, deslizamiento, viscosidad, entre otros; por ello se introduce esta variable para la potencia suministrada por una turbina hidrocínética<sup>12</sup>.

**2.4.5 Diseño óptimo del alabe.** El diseño del alabe de una turbina hidrocínética es un factor crítico debido a la resistencia que debe tener como resultado de las fuerzas dinámicas del medio en que va a operar. Por tanto, se debe tener presente la distribución de presión sobre la hoja, el mínimo coeficiente de presión y tener

<sup>11</sup> Ibid

<sup>12</sup> NARIMANTAS Zdankus, PETRAS Punys, Tadas Zdankus, Conversion of lowland river flow kinetic energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 38, 2014, Pages 121-130.

presente el efecto de la cavitación ocurrida cuando la presión cae a la presión del vapor del fluido<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> B.K. Kirke, Tests on ducted and bare helical and straight blade Darrieus hydrokinetic turbines, Renewable Energy, Volume 36, Issue 11, 2011, Pages 3013-3022.

### **3. PANORAMA GENERAL SOBRE ESTUDIOS, APLICACIONES Y AVANCES EN EL MUNDO**

Una revisión general de aplicaciones de turbinas hidrocínéticas en Colombia y el mundo, es fundamental para analizar el estado de la tecnología y sus avances en diversas aplicaciones e industrias

Es común encontrar bibliografía de este tipo de turbinas con aplicaciones en ríos y zonas costeras, tal es el caso de estudio de los autores Zdankus et al, donde presentan una investigación de la factibilidad para extraer energía de un río específico con bajo caudal y poco profundo, los autores concluyen que las bajas velocidades de la corriente del río limitan considerablemente la extracción de energía bajo este principio, por tanto, para este caso se debe evaluar otro tipo de tecnología<sup>14</sup>. Sin embargo, en 2015 los autores Kontoyiannis et al, realizaron una evaluación de las condiciones de la marea del estrecho de Euripo, en Grecia, como un atractivo para una aplicación con turbinas hidrocínicas; luego de estudios de velocidad del agua, correcta localización y otros parámetros, se determina que la instalación de un sistema de turbinas hidrocínicas podría generar anualmente 28,6 MW, aun sabiendo que la eficiencia del sistema alcance un 40 o 45%<sup>15</sup>.

En Colombia los autores Montoya et al, presentaron un trabajo donde realizaron una evaluación del uso potencial de turbinas hidrocínicas en los canales de descarga de dos centrales hidroeléctricas, teniendo en cuenta aspectos técnicos y financieros. El análisis evaluó las características hidráulicas de los canales y los correspondientes caudales de descarga. Los resultados mostraron que la tecnología no era factible en condiciones de mercadeo del momento y

---

<sup>14</sup> ZDANKUS, NARIMANTAS & SABAS, GINTAUTAS. The Impact of Hydropower Plant on Downstream River Reach. Environment Research, Engineering and Management. 4. 2006

<sup>15</sup> KONTOYIANNIS, H., PANAGIOTOPOULOS, M. and SOUKISSIAN, T., The Euripus tidal stream at Halkida/Greece: a practical, inexpensive approach in assessing the hydrokinetic renewable energy from field measurements in a tidal channel. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 1(3), 2015 pp. 325-335,

recomendaron monitorear la situación para identificar el momento para una óptima aplicación<sup>16</sup>. En cambio, los autores Holanda et al encontraron una factibilidad de implementación de este tipo de turbinas aguas abajo de las presas de la central hidroeléctrica Tucururi, en Brazil; la simulación demostro que una configuración de 10 turbinas podría generar 2.04 Gwh/año<sup>17</sup>.

Los autores Ramírez Tovar et al, en 2017, realizaron una simulación de una micro turbina tipo H-Darrieus con el objetivo de satisfacer la demanda energética en zonas aisladas. Para lograr esto diseñaron y evaluaron una micro turbina de eje vertical, usando un modelo computacional de CAD y realizaron una impresión 3D del modelo. La simulación muestra que la aplicación de la micro turbina, en ríos de bajo y medio caudal, puede generar 380 W de potencia máxima<sup>18</sup>.

La investigación publicada por los autores fabregas et al, en el 2018, tuvo como objetivo el diseño de una turbina hidrocinetica para generación, aprovechando la energía disponible en el Rio Magdalena. Realizaron la respectiva simulación de una turbina con 3 espadas totalmente sumergida y se enfatizaron en factores críticos como el torque, la velocidad angular, la eficiencia y geometría de la turbina; encontrando una clara viabilidad<sup>19</sup>.

En el 2019, Ibrahim et al, presentaron el resultado de una investigación del potencial hidrocinetico en el rio Pasir Kubur, Malasya. Determinaron que, a partir de la

---

<sup>16</sup> MONTOYA-RAMÍREZ, R.D., CUERVO, F.I. and MONSALVE RICO, C.A., Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: a case study. *Renewable Energy*, 99, 2016 pp. 136-147,

<sup>17</sup> HOLANDA, P. Da S., BLANCO, C.J.C., MESQUITA, A.L.A., BRASIL JUNIOR, A.C.P., DE FIGUEIREDO, N.M., MACÊDO, E.N., et al., Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, 101, 2017 pp. 1203-1214

<sup>18</sup> RAMIREZ-TOVAR, A.M., LÓPEZ, Y.U. and LAÍN, A.M., Design and prototype of a micro hydrokinetic vertical turbine. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 2017 pp. 903-910,

<sup>19</sup> FABREGAS-VILLEGAS, J., SANTAMARIA-DE LA CRUZ, H., MÁRQUEZ-SANTOS, M., FONTALVO-CALVO, C., CARPINTERO-DURANGO, J. and VILLADOMINGUEZ, J., Design of a hydrokinetic turbine capable of satisfying electricity demand for housing on the margin of the Magdalena River through analysis by finite elements. *International Journal of Engineering Science*, 7(4), 2018 pp. 6848-6850,

medición del muestreo, la velocidad promedio del agua es de 1,1 m/s mientras que la profundidad varia en un rango desde 0,55 a 5 m. Con base a los análisis y simulaciones, el rendimiento energético anual podría llegar a alcanzar 4 MWh, con un área de barrido de turbina de 1,5 m<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> IBRAHIM, W.I., ISMAIL, R.M.T.R. and MOHAMED, M.R., Micro-Hydro energy estimation for hydrokinetic energy harnessing at Sungai Lembing, Conference or Workshop, TK Electrical engineering. Electronics Nuclear engineering, 2019, pp. 549-562

## **4. POTENCIAL HIDROCINÉTICO EN TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA (ACUEDUCTOS)**

En el anterior capítulo se pudo apreciar que gran parte de las investigaciones están netamente dirigidas a la explotación de un potencial hidrocinético a partir de la instalación de turbinas en ríos y en zonas marítimas, por tanto, es importante identificar y analizar las industrias o compañías que han estudiado y realizado aplicaciones en tuberías o ductos de transporte de agua.

Es de interés dicha aplicación considerando que existen múltiples ventajas frente a otras formas de generación de energías renovables y aun sobre el mismo sistema, pero en otros escenarios.

Las ventajas más atractivas son las siguientes:

- La energía generada se puede estimar fácilmente debido al continuo monitoreo de presión y flujo de agua en la tubería.
- La mayoría de los proyectos en tuberías pueden estar exentos de licencia, ya que se utiliza una infraestructura existente, y tienen poco o ningún impacto ambiental<sup>21</sup>.
- Reduce la carga de trabajo de las válvulas reguladoras de presión.

### **4.1 BENCHMARKING**

Lucid Energy es una empresa dedicada a generar energía renovable a bajo costo en tuberías de agua alimentadas por gravedad. Mediante el sistema patentado LucidPipe permite que las instalaciones industriales, municipales y agrícolas

---

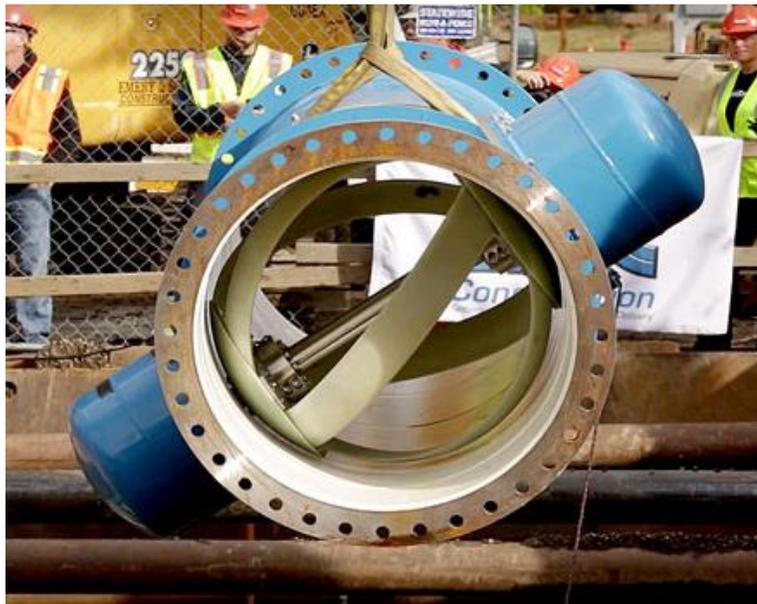
<sup>21</sup> Cardona Mancilla Cristian, Turbinas hidrocinéticas de eje horizontal: una revisión de literatura, 2018 pp. 180-197

produzcan electricidad limpia, confiable y de bajo costo a partir de sus tuberías de agua de distribución.

LucidEnergy se formó en el 2007 con la misión de crear una nueva forma para que las industrias, en particular aquellas que usan altas cantidades de agua y electricidad, conviertan energía a partir del agua en movimiento mediante la instalación de un generador de turbina en tuberías<sup>22</sup>.

**4.1.1 LucidPipe.** LucidPipe es un generador de turbina hidrocínética tipo Gorlov diseñada para trabajar en tuberías de diferente diámetro. Estas turbinas convierten motores de torque Siemens en generadores que pueden ser destinados para proyectos de capacidad nominal superior a 200kW<sup>23</sup>.

**Figura 7. Turbina tipo Gorlov patentada por Lucid Energy.**



Fuente. Lucid Energy, 2017.

---

<sup>22</sup> TEAM, Purdue ECT, "Lucidpipe™ Power system" (2016). *ECT Fact Sheets*. Paper 224.

<sup>23</sup> Ibid

Es evidente la ventaja de este tipo de máquinas frente a las formas convencionales de obtener energía de los recursos renovables, la eficiencia que posee LucidPipe y su practicidad son el primer pilar donde se destaca competitivamente frente a una implementación de turbina eólica y las demás formuladas para funcionar de forma hidrocínética. Luego se tienen los costos de montaje eléctrico para la obtención de los beneficios, los cuales sin duda la pone en la mira de las empresas interesadas en manejo de agua, la calidad frente a las otras tecnologías, y finalmente el impacto ambiental que tienen en los diversos puntos estratégicos en que se ha planteado su uso.

**4.1.2 Proyecto piloto en Riverside, California.** Desde marzo del 2010, el canal de Riverside ha sido el banco de prueba para investigación y desarrollo de LucidPipe, trabajando en alianza con la empresa de servicios públicos RPU (Riverside Public Utilities). Se pusieron a prueba tres diseños de turbinas patentadas y diseñadas para recuperar energía en tuberías de agua alimentadas por gravedad. Mediante estas pruebas Lucid Energy logro refinar el diseño de la turbina y optimizar el sistema para mayor durabilidad, confiabilidad y producción energética<sup>24</sup>.

En el año 2012, Lucid Energy completo la primera instalación comercial con un sistema de una sola turbina de 42” en el canal de Riverside, en donde la electricidad generada se utiliza en el día para abastecimiento de operaciones de distribución de agua y en la noche para dar energía al alumbrado público de la ciudad.

**4.1.3 Proyecto en Portland, Oregon.** En enero del 2015 las empresas Lucid Energy junto con Portland Water Bureau y Portland General Electric anunciaron la puesta en marcha de un sistema de turbinas hidrocínéticas LucidPipe de 200 kW instalado en una tubería de agua en Portland, Oregon. Fue el primer proyecto

---

<sup>24</sup> ALLEN NEWTON Jennifer, "Lucid Energy Dreams", In-pipe hydropower systems spell opportunity, 2012.

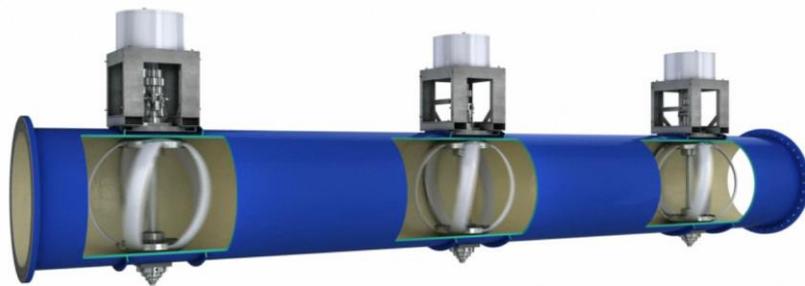
hidroeléctrico en EE.U.U., que aseguro una compra por 20 años de energía renovable generada por turbinas instaladas en tuberías de distribución de agua.

El sistema de energía LucidPipe utiliza el flujo del agua en el interior de la tubería para hacer girar 4 turbinas de 42" que producen electricidad para la empresa Portland General Electric, la cual a su vez vende esta energía como compromiso a las energías renovables y a la generación local de electricidad<sup>25</sup>.

**4.1.3.1 Normatividad.** LucidPipe genera energía renovable a partir del flujo del agua en tuberías sin afectar las operaciones de distribución de la misma, fue probada y certificada por la NSF international según NSF/ANSI Norma 61 para uso en sistemas de agua potable y también adecuado para su uso en aguas agrícolas, industriales y residuales<sup>26</sup>.

**4.1.3.2 Capacidad de generación.** Es un proyecto con capacidad nominal de 200 kW, con posibilidad para generar en promedio 1100 MWh por año, suficiente electricidad para alimentar 150 hogares.

**Figura 8. Distribución básica de tres turbinas Lucid Pipe.**



Fuente. Lucid Energy, 2016.

<sup>25</sup> LUCID ENERGY, INC., *LucidEnergy™: Harvesting renewable, low-cost electricity from gravity-fed water pipes*. 2012

<sup>26</sup> Ibid

**4.1.4 Capacidad de potencia.** Lucid Energy ofrece 3 tipos de turbinas teniendo en cuenta el diámetro de la tubería a implementar, en la figura siguiente se muestra la potencia y el caudal mínimo requerida para el funcionamiento de dichas turbinas para cada caso.

**Figura 9. Diámetros de tuberías, capacidad y flujo mínimo requerido para uso de turbinas Lucid Pipe.**



Fuente. Lucid Energy, 2018.

- Tubería de 24" (600 mm): Capacidad de generación 18 kW con un flujo mínimo requerido 1 m<sup>3</sup>/s.
- Tubería de 42" (1050 mm): Capacidad de generación 50 kW con un flujo mínimo requerido de 2,7 m<sup>3</sup>/s.
- Tubería de 60" (1500 mm): Capacidad de generación de 100 kW con un caudal mínimo requerido de 5,6 m<sup>3</sup>/s.

## **5. APLICACIÓN TURBINAS HIDROCINÉTICAS EN INDUSTRIA OIL&GAS**

Para el desarrollo de este capítulo, se tomará como ejemplo las facilidades de tratamiento de agua existentes en un Campo Rubiales, así como su sistema de distribución de aguas de producción y su pad de inyección.

### **5.1 HISTORIA DE INYECCIÓN EN EL CAMPO**

Los procesos de inyección de agua realizados en Campo Rubiales han sido destacables a través de la historia, esto debido a los altos cortes de agua que presenta la producción diaria de petróleo.

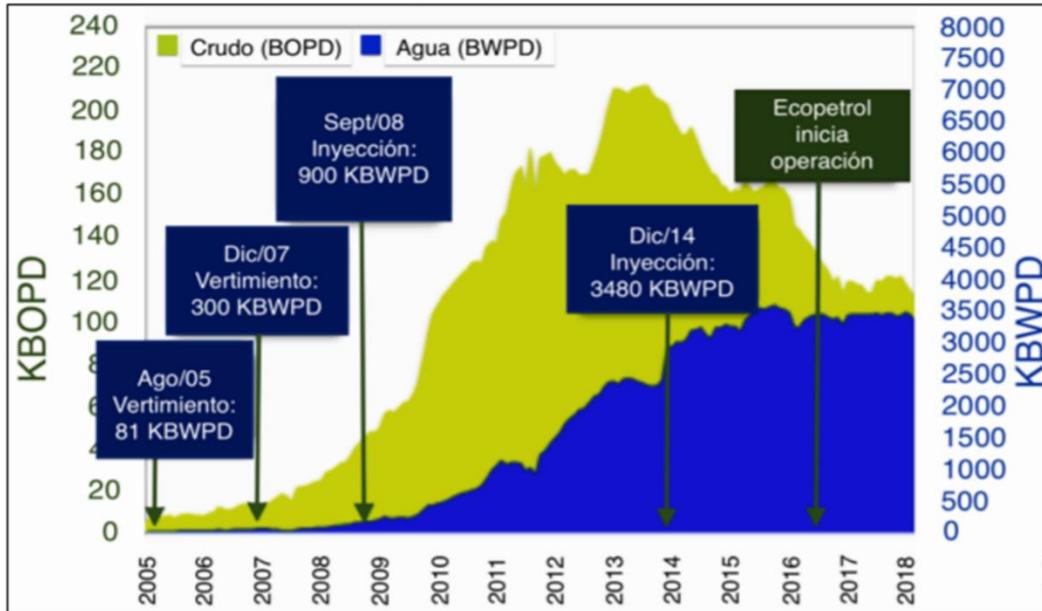
En la actualidad, más del 94% de la producción es agua, por tanto, la re-inyección es el proceso más atractivo para lograr darle una disposición final a este fluido y obtener beneficios en el yacimiento como por ejemplo el mantenimiento de presión.

En el año 2001 se inició la disposición de agua mediante el vertimiento al Caño Rubiales, con un volumen aproximado de 27 KBWPD. Este volumen fue incrementado año tras año hasta el 2007, donde se alcanza el límite con 300 KBWPD. En el año 2008 se inició la inyección de agua de producción en la formación Carbonera con un volumen de 900 KBWPD<sup>27</sup>.

---

<sup>27</sup> BETANCOURT NAVARRO, Maria Paula, Optimización Del Sistema De Inyección De Agua De Un Pad Del Campo Rubiales Mediante La Evaluación Del Potencial De Los Pozos Y El Rediseño De Los Equipos De Bombeo 2019

**Figura 10. Historia de inyección de agua en Campo Rubiales.**



Fuente. Ecopetrol, 2019.

**5.1.1 Tratamiento del agua de producción.** El fluido de producción se recolecta en Centros de Procesamiento de Fluidos de Campo y el agua residual proveniente de los tanques de separación de agua libre, separadores y tratadores electrostáticos ingresa a las facilidades de tratamiento de agua.

Con el objetivo de llevar el agua de producción a estándares de calidad y control ambiental establecidos para inyección, se deben realizar los procesos de desnatado, flotación y filtración.

Actualmente, este campo maneja dos Centros de Procesamiento: CPF1 con una capacidad para tratar agua de producción de 1,9 MBWPD, destinados para vertimiento e inyección; y CPF2 con una capacidad de hasta 2,05 MBWPD, destinados únicamente para inyección.

Una vez el agua se encuentra en piscinas y en especificaciones, se transfiere al PAD de inyección correspondiente.

**5.1.2 PAD de inyección.** Mediante una línea de transferencia de 24", el agua es trasladada al PAD de inyección de interés. El PAD cuenta con bombas centrífugas horizontales encargadas crear un diferencial de presión entre la presión de succión y presión de descarga para lograr llevar dicha agua a la formación deseada

**Figura 11. Bombas centrífugas para inyección de agua.**



Fuente Borets Services,2021.

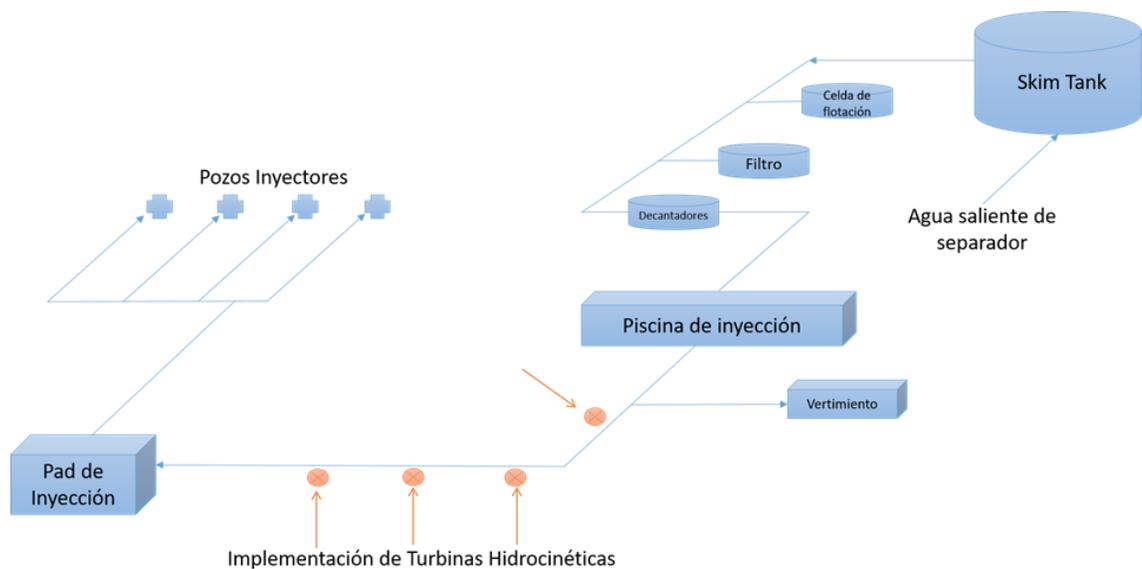
Es común encontrar restricciones o choques ajustables instalados luego de la descarga, los cuales cumplen la función de modificar la presión o el flujo conforme al requerimiento de operación.

Las líneas que interconectan los equipos, para este campo, son de 6 pulgadas para luego pasar a 4 ½ o 7 1/16 según el cabezal del pozo.

## 5.2 TURBINAS HIDROKINÉTICAS EN LÍNEAS DE TRANSFERENCIA DE AGUA DE PRODUCCIÓN A PAD DE INYECCIÓN.

En el siguiente Layout se presenta el resumen del trayecto del agua de producción para este campo en especial, además de especificar el lugar donde se podrían instalar estos sistemas hidrocínéticos, sin llegar a alterar el ciclo ya propuesto.

**Figura 12. Layout instalación de turbinas hidrocínéticas.**



El sistema de distribución seleccionado consta de las siguientes características:

- Longitud del trayecto: 5.05 Km
- Diametro de la tubería: 24"
- Caudal: 453.768 BWPD
- Presion de salida de CPF: 250 psi
- Presion de entrada al pad: 50 psi

Esta ubicación se selecciona partiendo de que estas líneas de distribución cuentan con un diámetro de 24", en el capítulo anterior se especificó que actualmente se han desarrollado turbinas de este diámetro en otras industrias, por tanto, la viabilidad de aplicación en dicha zona es mayor que la implementación posterior a las bombas centrífugas, donde se tienen tuberías de diámetros reducidos.

Es crítico considerar la caída de presión del fluido posterior al paso por la turbina, esto debido a que se puede generar una posible cavitación en las bombas, el seguimiento de las presiones previas a la entrada de las bombas es fundamental para el correcto funcionamiento de las mismas y evitar posibles vibraciones o daños prematuros. Unos de los controles para evitar una posible cavitación es la alarma por baja presión de succión, para este campo en específico se considera una baja presión de succión cuando cae por debajo de los 30 psi.

**Figura 13. Recorrido línea de distribución de agua seleccionada.**



Fuente. Ecopetrol, 2021.

### 5.3 CÁLCULO DE POTENCIA PARA EL SISTEMA PLANTEADO

La potencia de salida del sistema de conversión de energía, está dada por la siguiente ecuación, ya mencionada en el capítulo 2:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p$$

Donde:

$P$ : Potencia de salida en Watts

$\rho$ : Densidad del fluido

$A$ : Área de barrido de las espadas del rotor en  $m^2$

$V$ : Velocidad de flujo en m/s

$C_p$ : Coeficiente de potencia, propio de cada turbina, también representa la eficiencia de la misma.

Luego de la revisión bibliográfica y el benchmarking se puede analizar que la turbina tipo Gorlov, de la empresa LucidEnergy, puede ser la que más se aproxime a la aplicación OIL&GAS, esta selección se basa en los proyectos pilotos ya realizados en diferentes acueductos, en donde se trabaja con tuberías de diámetros semejantes a los de la línea de distribución agua de yacimiento, presiones similares y, por supuesto, un fluido con unas características muy similares.

Para efectos de cálculos se aceptará de la bibliografía la ecuación más aproximada de dicha turbina para el cálculo del área de barrido, esto debido a que la turbina LucidPipe se encuentra patentada.

El cálculo de área de barrido para turbina tipo Gorlov de 24", asumiendo un diámetro y altura iguales a 24" o 0.6096 m, está dada por la siguiente ecuación:

$$A = 0,65(D * H) = 0,65 * 0,6096 * 0,6096 \cong 0,242 \text{ m}^2$$

El cálculo de la velocidad del flujo está definido por la siguiente ecuación:

$$Q = V * A$$

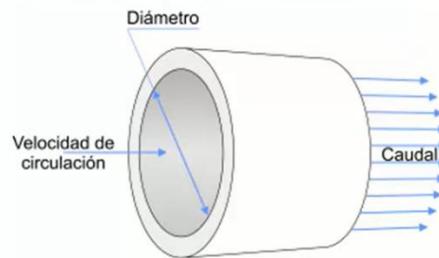
Donde

$Q$ : Caudal

$V$ : Velocidad

$A$ : Área de la sección transversal

**Figura 14. Caudal, diámetro y velocidad de flujo en una tubería.**



Fuente.

Ahora bien, se tiene un caudal de 453768 BWPD o 3005.97 m<sup>3</sup>/h y un área transversal de 0.29186 m<sup>2</sup>

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{3005.97}{0.29186} = 10299.36 \frac{\text{m}}{\text{h}} = 2.86 \text{ m/s}$$

Reemplazando en la ecuación principal y contemplando la densidad del agua como 1000 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene:

$$P = \frac{1}{2} * 1000 * 0.242 * 2.86^3 * 0.98$$

$$P = 2774 \text{ Watt} \cong 2.77 \text{ kW}$$

La producción energética por turbina es de 2.77 kW, para un año será aproximadamente de 24.26 MWh. Teniendo en cuenta que la pérdida de presión por turbina es aproximadamente 6 psi, se podría instalar un máximo de 3 turbinas sin llegar a afectar el setting de baja presión de succión, por tanto, se alcanzaría una potencia de generación de 8.31 kW equivalente a 72.76 MWh en un año.

Actualmente Campo Rubiales tiene más de 600 pozos activos con una producción que excede los 100 KBPD, posicionándose en el primer lugar como el campo con mayor producción en Colombia. El requerimiento energético en este campo es bastante amplio superando los 180 MWh por día y 65700 MWh en un año<sup>28</sup>. El porcentaje que estaría compensando 3 turbinas en serie correspondería al 0.1%; es un porcentaje bastante bajo, sin embargo, se debe tener presente las condiciones bajo las cuales este campo opera.

#### **5.4 LUCIDPIPE EN LA INDUSTRIA OIL&GAS**

Efectivamente la compañía Lucid Energy ofrece turbinas para tuberías de 24" y garantiza una producción energética de 18 kW con una caída de presión por turbina de un rango entre 3-5 psi, según su brochure, además se debe asegurar un caudal mínimo 16500 GPM.

---

<sup>28</sup> Ecopetrol, 2022.

**Figura 15. Datos proporcionados por la empresa Lucid Energy para sus turbinas disponibles.**

	LPS24A	LPS30A	LPS42A	LPS60A
English	24"	30"	42"	60"
Metric	600 mm	760 mm	1060 mm	1500 mm
Rated Power	18 kW	23 kW	50 kW	100 kW

**Flow Rate / Rated Power:** The minimum flow for rated power. Lower flow creates less energy.

	LPS24A	LPS30A	LPS42A	LPS60A
<b>English - gallon/minute</b>	16500 GPM	24500 GPM	44500 GPM	89150 GPM
<b>English - million gal/day</b>	24 MGD	35 MGD	64 MGD	128 MGD
<b>Metric - cubic meter/sec</b>	1.0 CMS	1.5 CMS	2.8 CMS	5.6 CMS

Fuente Brochue Lucid Energy, 2016

## 6. CONCLUSIONES

- Luego de realizar una revisión de la literatura se concluye que la implementación de turbinas hidrocínicas en la industria OIL&GAS podría llegar a ser un proyecto viable teniendo en cuenta los altos caudales de agua que circulan diariamente en las líneas de transferencia de agua, las velocidades de flujo y los diámetros de tuberías presentes en muchos campos. Luego de realizar una revisión a la literatura y un benchmarking, la turbina más apropiada para un ambiente semejante a una línea de distribución de agua de formación, es una turbina de eje vertical tipo Gorlov con un diámetro de 24", propia para la aplicación del campo de referencia.
- Después de realizar los cálculos de potencia de salida, considerando las variables de mayor impacto como son: el diámetro de la tubería, la velocidad del fluido, el área de barrido de la turbina, densidad del agua y una eficiencia bastante optimista; se obtuvo un valor cercano a los 2.77 kW por turbina instalada con una caída de presión que se aproxima a los 6 psi.
- Para la aplicación específica del campo de referencia, se podría realizar la instalación de un máximo de 3 turbinas, sin afectar el ajuste de baja presión de succión en el pad de inyección, y alcanzar una potencia de salida de 72.76 MWh en un año.

## 7. RECOMENDACIONES

- Posterior a la revisión de bibliografía se evidenció que existen numerosos estudios para aplicaciones de turbinas hidrocinéticas en zonas remotas, instaladas principalmente en ríos y zonas costeras, sin embargo, existe poca bibliografía relacionada con implementaciones en ductos o tuberías de corrientes de agua; esta tendría un gran impacto en muchas industrias donde circulan diariamente grandes caudales de agua para llevar a cabo diversos procesos.
- Existe una oportunidad para profundizar aspectos teóricos, de diseño y financieros para proyectos de turbinas con aplicaciones específicas en tuberías de distribución de agua y más concretamente, realizar una evaluación de factibilidad económica para impulsar proyectos donde los sistemas hidrocinéticos son protagonistas en la generación de energía eléctrica, instaladas en líneas de distribución de agua de formación, en la industria de los hidrocarburos.

## BIBLIOGRAFÍA

ALLEN NEWTON Jennifer, "Lucid Energy Dreams", In-pipe hydropower systems spell opportunity, 2012.

BETANCOURT NAVARRO, Maria Paula, Optimización Del Sistema De Inyección De Agua De Un Pad Del Campo Rubiales Mediante La Evaluación Del Potencial De Los Pozos Y El Rediseño De Los Equipos De Bombeo 2019

CASINI, Marco. Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale. International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 4. 10.12720/sgce.4.4. 2015 pp. 316-327.

DINESH KUMAR, SHIBAYAN SARKAR, A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 58, 2016, Pages 796-813.

GARCÍA J., CABARCAS M., y HERRERA S.. "Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del caribe colombiano". El Reventón Energético, 15(2), 89-105, 2017

GAURAV SAINI, ANUJ KUMAR, R.P. Saini, Assessment of hydrokinetic energy – A case study of Eastern Yamuna canal, Materials Today: Proceedings, Volume 46, Part 11, 2021, Pages 5223-5227.

GÜNEY M.S., KAYGUSUZ K., Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Pages 2996-3004.

KIRKE B.K., Tests on ducted and bare helical and straight blade Darrieus hydrokinetic turbines, *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 11, 2011, Pages 3013-3022.

NABZAR L., and DUPLAN J.. "Water in fuel production: Oil production and refining". Panorama 2011, IFP Energies, 2011.

NARIMANTAS ZDANKUS, Petras Punys, Tadas Zdankus, Conversion of lowland river flow kinetic energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 38, 2014, Pages 121-130.

RAKESH, C., NALLODE, C., ADHVAITH, M., ANWIN, T. J., KRISHNA, A. A., & RAKESH, C. Theoretical study and performance test of lucid spherical turbine. *International Journal*, 3, 2016 pp. 418-423.

SÁNCHEZ C., "Turbinas hidrocínicas una alternativa para generación eléctrica," 2016.

SÁNCHEZ, Claudia. Turbinas hidrocínicas una alternativa para generación eléctrica. 2016 2. 10.

TEAM, PURDUE ECT, "LUCIDPIPE™ POWER SYSTEM" (2016). *ECT Fact Sheets*. Paper 224.

VERMAAK H. J., KUSAKANA K., and KOKO S. P., "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.