

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

INGENIERÍA

Carrera: Ingeniería Mecánica
Trabajo de Diploma

Título: Diseño preliminar de Bomba manométrica en espiral.

Autor: Eddy Frank Rodriguez Valdivie.

Tutor: Dr. Juan B. Cogollos Martínez

Cienfuegos 2022.

Pensamiento

La mecánica es el paraíso de las ciencias matemáticas, porque con ella se alcanza el fruto matemático.

Leonardo Da Vinci

Dedicatoria

La presente tesis se la dedico a toda mi familia y amigos, principalmente a mi madre que ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme confianza, consejos, y oportunidad para lograrlo, a mi hermana ya que junto a mi madre me han guiado por el buen camino ser un profesional, y por ultimo a esos verdaderos amigos con el cual compartí todos estos años.

Agradecimientos

A mi tutor DrC Juan B. Cogollos Martínez por guiarme sabiamente en la realización de la tesis, a mis profesores, compañeros de aula y a todo aquel que de una forma u otra puso su granito de arena en mi formación como ingeniero mecánico, en especial a mi profesora de proyecto DraC Jenny Correa Soto

Resumen

Se realiza un estudio de los diferentes tipos de bombas helicoidales y su uso en la agricultura. Se particulariza en los estudios de las bombas manométricas en espiral, debido a su facilidad y bajo costo de construcción, además de la posibilidad de utilizar corrientes de agua con velocidades bajas y sin necesidad de saltos de agua, como fuente de energía. No se necesitan instalaciones complejas para anclarlas en las corrientes de agua. Es posible instalarlas encima de flotadores. Se define un algoritmo para el cálculo de los diferentes parámetros de salida y el dimensionamiento de las piezas fundamentales, a partir del cual es posible realizar el diseño de un prototipo. Los valores obtenidos permiten definir las dimensiones de la bomba en dependencia de las demandas de flujo y carga y de las condiciones de la corriente que moverá la rueda. Se observa que incluso para altos valores de flujo necesario (y carga), las dimensiones de la rueda hidráulica son relativamente pequeña. La bomba con espiral simple puede ser el prototipo a construir para estudiar el comportamiento del equipo en condiciones de explotación.

Summary

A study of the different types of helical pumps and their use in agriculture is carried out. It is particularized in the studies of spiral manometric pumps, due to its ease and low cost of construction, in addition to the possibility of using water currents with low speeds and without the need for waterfalls, as a source of energy. No complex installations are needed to anchor them in water currents. It is possible to install them on top of floats. An algorithm is defined for the calculation of the different output parameters and the dimensioning of the fundamental parts, from which it is possible to design a prototype. The values obtained allow defining the dimensions of the pump depending on the flow and load demands and the conditions of the current that will move the wheel. It is observed that even for high values of necessary flow (and load), the dimensions of the hydraulic wheel are relatively small. The simple spiral pump can be the prototype to be built to study the behavior of the equipment in operating conditions.

Índice

Contenido

Introducción1

Capítulo 1: Marco teórico de la investigación3

1.1 Introducción3

1.2 Evolución de los tipos de bombas3

1.3 Clasificación de tipos de bombas7

1.4 Principio de funcionamiento de la bomba manométrica12

1.5 Utilización de la bomba manométrica de espiral18

1.5.1 Aplicaciones de la bomba manométrica de espiral19

1.6 Diseño conceptual de bombas manométricas espirales24

1.6.1 Selección de materiales30

1.7 Conclusiones parciales32

Capítulo 2. Metodología de cálculo de la Bomba manométrica en espiral34

2.1 Introducción34

2.2 Modelo de cálculo34

2.3 Conclusiones parciales37

Capítulo 3. Análisis de la influencia de los parámetros de diseño de la bomba en sus características de funcionamiento38

3.1. Introducción38

3.2 Experimento virtual38

3.3 Conclusiones parciales49

Conclusiones Generales50

Recomendaciones51

Bibliografía52

Anexos|**Error! Marcador no definido.**

Introducción

La falta o el alto costo de las fuentes de energía convencionales, es decir, la electricidad o los combustibles fósiles en las zonas rurales, afectan el suministro de agua y, en consecuencia, su desarrollo y comprometen la supervivencia rural. Entre las posibles soluciones, los sistemas de bombeo no convencionales, como la bomba de serpentín, está ganando la atención por su bajo costo y fácil implementación. Este tipo de bomba funciona transformando la energía cinética del arroyo (es decir, un río) en energía potencial expresada por agua a alta presión en la salida de la bomba sin consumo de energía eléctrica ni de combustibles fósiles. La bomba helicoidal es un sistema de fácil construcción, que se basa sobre prototipos evolucionados de la bomba de Arquímedes (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019).

La primera versión de bomba helicoidal fue propuesta por Andrew Wirtz en 1749. Posteriormente, en 1979, en el Blair Research Lab de Zimbabue se diseñó una bomba helicoidal, denominada bomba hidrostática o manométrica. A continuación, las investigaciones abordaron el problema desde una perspectiva analítica. En se propone un modelo analítico de bomba helicoidal para ser utilizado en las etapas de diseño y construcción. En base a esto, se prueba una bomba helicoidal para determinar la eficiencia en función de la velocidad de rotación, la relación de inmersión y el rendimiento de bombeo con diferentes capas de mangueras. Por otro lado, la determinación de la relación entre el número de capas del serpentín y la presión de salida y con el caudal se investiga en concluyendo que a más capas de manguera más presión sin ningún efecto en el caudal de agua. En otra investigación se determina un crecimiento en el caudal de agua de salida como resultado de dos factores: primero, un aumento de la velocidad de rotación y, segundo, un aumento de la relación de sumersión, en ambos casos se produce la misma salida presión (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019).

Por otra parte, la situación mundial se pronostica que para el 2025 más de 5 mil millones de personas o dos tercios del planeta se verán afectados por una escasez de agua de moderada a grave. Esta escasez será causada tanto por el cambio climático como por el crecimiento de la población humana y dará como resultado que más personas caminen mayores distancias para satisfacer sus necesidades diarias de agua. Esta mayor carga recaerá de manera desproporcionada sobre las mujeres y las niñas, que suelen ser las

responsables de recolectar agua para sus familias y que ya dedican un promedio de tres horas al día a esta laboriosa tarea². La escasez de agua también significará mayores tensiones para los productores agrícolas que actualmente usan aproximadamente el 70 por ciento de toda el agua dulce disponible para regar cultivos y animales (Thompson et al, 2011)

En la mayoría de los países en desarrollo más pobres del mundo, existen incentivos para aumentar la producción agrícola, lo que requiere riego por bombeo. Al mismo tiempo, existe una creciente necesidad de encontrar métodos para energizar las bombas de riego que no dependan del petróleo y la electricidad importados (Yannopoulos et al., 2015).

En Cuba en aras de buscar una agricultura sostenible, donde disminuir el uso de portadores energéticos es indispensable, se hace factible el empleo de este tipo de tecnología.

Problema Científico

No se reportan estudios del comportamiento de los parámetros de diseño de la Bomba manométrica en espiral y la potencia necesaria para el riego sostenible.

Hipótesis

A partir de un diseño preliminar de la bomba manométrica en espiral, es posible determinar su comportamiento para el riego sostenible.

Objetivo General: Realizar el diseño preliminar de una bomba manométrica espiral

Objetivos Específicos:

- 1 Estudio de modelos de bombas manométricas en espiral y métodos de cálculo.
- 2 Obtener metodología de cálculo en función de los parámetros de funcionamiento.
- 3 Análisis de la influencia de los parámetros de diseño de la bomba en sus características de funcionamiento.

La tesis posee la siguiente estructura resumen, summary, introducción, tres capítulos, conclusiones generales, recomendaciones, bibliografía, anexos.

Capítulo 1: Marco teórico de la investigación

1.1 Introducción

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica referente a la evolución de los tipos de bombas, su clasificación, el principio de funcionamiento de la bomba manométrica, la utilización de la bomba manométrica espiral, algunas aplicaciones, el diseño conceptual para su construcción y la selección de materiales para su diseño y el objetivo, en función de dar cumplimiento al objetivo específico relacionado con estudio de modelos de bombas manométrica en espiral y métodos de cálculo.

1.2 Evolución de los tipos de bombas

Yannopoulos et al (2015) presenta y discute la evolución de los principales logros en dispositivos de elevación de agua con énfasis en las principales tecnologías a lo largo de los siglos. Se proporcionan valiosos conocimientos sobre las antiguas tecnologías de extracción de agua con sus aparentes características de durabilidad, adaptabilidad y sostenibilidad. Se lleva a cabo una comparación de los desarrollos tecnológicos relevantes en varias civilizaciones tempranas. Estas tecnologías son la base de los logros modernos en la ingeniería del agua. Representan el mejor paradigma para sondear el pasado y afrontar el futuro. Se presenta una cronología del desarrollo histórico de las bombas de agua en todo el mundo a lo largo de los últimos 5500 años de la historia de la humanidad. Se sigue un orden cronológico con énfasis en las principales civilizaciones.

La búsqueda de soluciones tecnológicas eficaces a los problemas de abastecimiento de agua tiene una larga historia y tiene sus orígenes en la prehistoria. La unión de la tecnología con la ciencia y la filosofía, que comenzó en la antigua Mesopotamia, Egipto, Grecia, China e India, fue un avance importante. La necesidad del hombre de acceder a los recursos hídricos siempre ha sido un tema primordial, no solo para asegurar la supervivencia, sino también para mejorar la calidad de vida. De hecho, el bombeo permitió el desarrollo de asentamientos en lugares que no eran sostenibles en la antigüedad. Asegurar el suministro de agua para la población de una ciudad, pero también el desarrollo de la agricultura, dependía en gran medida de la capacidad de transportar agua a largas distancias y cuesta arriba, trabajando contra la gravedad (Yannopoulos et al., 2015).

La necesidad de extraer, transportar y distribuir agua venciendo las fuerzas de fricción y gravedad encontró su solución en las diversas formas de bombas (dispositivos de elevación de agua). La energía requerida para superar estas fuerzas fue proporcionada naturalmente por la mano de obra (bombeo manual), los animales y la explotación de las fuerzas de la naturaleza (viento y flujo de agua). Las primeras bombas mecánicas eran dispositivos simples, pero también ingeniosos que permitían el uso de fuentes de energía naturalmente disponibles para realizar la tarea deseada de transporte y elevación de agua. Varios hitos fueron marcados a lo largo de la historia, desde los egipcios, chinos y persas y el tornillo de Arquímedes hasta las modernas bombas de pistón y de vacío, demostrando una vez más el ingenio del hombre (Yannopoulos et al., 2015). La Revolución Industrial (la invención de la máquina de vapor y el desarrollo de los motores eléctricos) trajo consigo nuevas posibilidades y prestaciones, mediante el uso de formas de energía química y eléctrica, pero las bombas modernas aún se basan en los primeros conceptos en cuanto a sus principios mecánicos de funcionamiento se refieren. De hecho, las bombas centrífugas y de desplazamiento modernas tienen claramente su origen en los conceptos y diseños antiguos (Kyriakopoulos, 2015). La principal diferencia radica en la forma de proporcionar la energía requerida. Las bombas centrífugas y de desplazamiento modernas tienen claramente su origen en los conceptos y diseños antiguos. La principal diferencia radica en la forma de proporcionar la energía requerida. Las bombas centrífugas y de desplazamiento modernas tienen claramente su origen en los conceptos y diseños antiguos (Kyriakopoulos, 2015). La principal diferencia radica en la forma de proporcionar la energía requerida.

Muchas civilizaciones antiguas, como la egipcia, la persa, la india y la china, han buscado soluciones tecnológicas para la elevación y el transporte de agua. Al evaluar la historia del bombeo y el transporte de agua, debemos basarnos en los hallazgos arqueológicos y los registros históricos. La falta de registros históricos limita, por supuesto, nuestra comprensión de la disponibilidad de estas tecnologías en algunas culturas antiguas, como la América precolombina (Yannopoulos et al., 2015).

La revisión de las diversas tecnologías utilizadas en todo el mundo muestra claramente que existen muchas similitudes en los métodos y tecnologías utilizados por las distintas civilizaciones antiguas. En muchos casos, es una tarea imposible delinear dónde y quién inventó por primera vez una tecnología en particular. Como es bien sabido, la antigua

cultura helénica es considerada la cuna de la civilización occidental hace unos 4000 años. Las contribuciones de los antiguos helenos a los campos de la democracia, las ciencias, la filosofía, el arte, la arquitectura y la historia son sin duda incomparables y todavía influyen en la vida de las personas (Yannopoulos et al., 2015).

Específicamente, la antigua tecnología helénica se desarrolló por primera vez en el siglo V a. C., ha continuado hasta el período romano inclusive, y más allá. En cuanto a la tecnología hidráulica, los antiguos helenos, a través de sus viajes y comercio, entraron en contacto y asimilaron las técnicas de otras civilizaciones, las desarrollaron e inventaron con gran ingenio otras nuevas, como las famosas máquinas del siglo III a. tornillo hidráulico, el molino rotatorio, la prensa de tornillo, las técnicas de fundición de bronce, el reloj hidráulico, el órgano de agua y muchos otros. Estos inventos constituyen hoy en día los componentes básicos de nuestra tecnología moderna, cuyo desarrollo sería dudoso sin ellos. La exploración de esta época demuestra cuánto más (de lo que creemos) la moderna civilización tecnológica occidental le debe a la helénica. Aparentemente, las ideas, tecnologías y prácticas desarrolladas durante la mayoría de las civilizaciones helénicas influyeron mucho en nuestro conocimiento tecnológico moderno): Exceptuando la maquinaria, casi no hay nada secular en nuestra cultura que no venga de Grecia (Koutsoyiannis and Patrikiou, 2013).

Cabe señalar que, si bien el uso de bombas modernas puede ayudar a mejorar el suministro de agua y extender la agricultura de regadío en el mundo, la extracción extrema de agua subterránea también representa una seria amenaza para el desarrollo sostenible. Aunque el bombeo de alta capacidad debido al uso de energía eléctrica en lugar de bombas manuales ha producido tierras más fértiles, los agricultores vecinos fueron excluidos de las fuentes mínimas de agua para regar sus tierras, mientras culpan al gobierno por la situación (Yannopoulos et al., 2015).

La tecnología tiene la misma edad que la humanidad. Desde la antigüedad hasta nuestros días, la mayoría de las innovaciones tecnológicas se difundieron o desaparecieron en respuesta a las necesidades y las perspectivas comerciales de facilitar la vida humana. En nuestros días, la tecnología es una empresa social compleja que incluye no solo investigación, diseño y artesanía, sino también finanzas, fabricación, gestión, mano de obra, marketing y mantenimiento (Yannopoulos et al., 2015).

La demanda de tecnología de elevación de agua para satisfacer las necesidades de consumo, producción de alimentos y domésticas es muy fuerte en los países pobres del tercer mundo. En estos países, las tecnologías de extracción de agua tienen una aplicación limitada debido a una combinación de razones técnicas, económicas y sociales. Algunas razones evidentes son los costos operativos y de capital requeridos y la falta total de servicios de apoyo para el mantenimiento. Probablemente, la mayoría de los pequeños agricultores buscan seguridad y se adhieren a tecnologías familiares y fácilmente disponibles, para las cuales la ayuda, el asesoramiento y las piezas de repuesto son innecesarias o están fácilmente disponibles y los riesgos se minimizan. Sin embargo, si todos siguieran esta mentalidad, nunca estarían disponibles tecnologías nuevas y quizás mejores (Yannopoulos et al., 2015).

Por lo tanto, los gobiernos, las agencias de ayuda internacional y las instituciones tienen que tomar iniciativas para el futuro desarrollo de la agricultura a pequeña escala. Además, deben asumir los riesgos en esta área en nombre de los agricultores locales y probar y demostrar cualquier tecnología que parezca prometedora en el contexto de riego local. En la mayoría de los países en desarrollo más pobres del mundo, existen incentivos para aumentar la producción agrícola, lo que requiere riego por bombeo. Al mismo tiempo, existe una creciente necesidad de encontrar métodos para energizar las bombas de riego que no dependan del petróleo y la electricidad importados (Yannopoulos et al., 2015).

De hecho, existe la posibilidad de combinar tecnologías antiguas con conocimientos técnicos y equipos actuales. Fraenkel (1986), señaló que: antes de buscar nuevas técnicas radicales de extracción de agua, también hay mucho margen para mejorar los métodos tradicionales y convencionales de bombeo y distribución de agua.

La amplia gama de opciones para proporcionar energía para el bombeo de agua incluye algunas tecnologías tradicionales (por ejemplo, molinos de viento, etc.) y algunas tecnologías completamente nuevas que se deben a desarrollos muy recientes, como las bombas alimentadas con energía solar fotovoltaica. Además, existen tecnologías que han sido ampliamente y exitosamente utilizadas en una sola área, pero que siguen siendo desconocidas e inutilizadas en otras áreas con condiciones climáticas similares. Un ejemplo es la bomba de turbina hidráulica, que se ha utilizado ampliamente (decenas de miles) únicamente en China (Fraenkel, 1986), La tecnología de la rueda hidráulica se

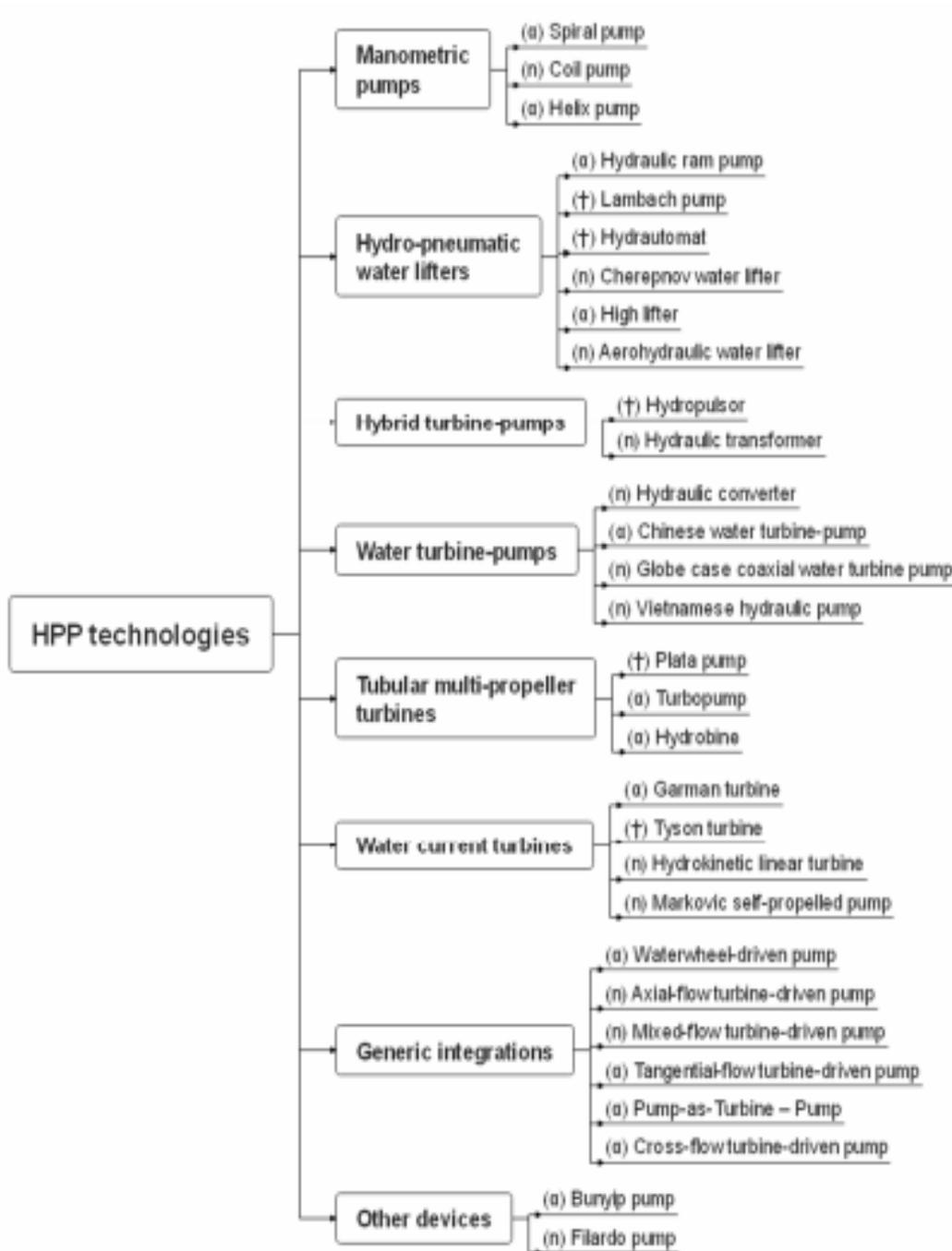
mejoró hasta convertirse en un arte fino, hasta la época de la Revolución Industrial. La eficiencia de las ruedas hidráulicas se ha acercado al 70% (Ibrahim, Che and Azhari, 2010).

Es un hecho que las antiguas tecnologías de bombeo todavía se utilizan hoy en día en varias partes del mundo en desarrollo. Las prioridades de investigación deben llevarse a cabo hacia el desarrollo de enfoques y prácticas rentables, basados en la modernización de tecnologías históricas de extracción de agua de bajo costo, a través del reemplazo de la fuerza muscular (humana o animal) por fuentes naturales de energía. Esto es posible gracias al reciente avance tecnológico en el sector de las energías renovables. Un buen paradigma proviene de la época helenística, cuando Heron de Alejandría reemplazó la fuerza muscular para operar la palanca del Hydraulis (Órgano de agua) por energía eólica (Tassios, 2015). Otro ejemplo es la adaptación de la rueda hidráulica tradicional, que es una construcción sencilla para su uso con fuentes de energía renovables (Yannopoulos et al., 2015).

1.3 Clasificación de tipos de bombas

Intriago et al. (2019) identificaron 30 tecnologías y se agruparon en ocho clases: (i) Bombas manométricas, (ii) elevadores de agua hidroneumáticos; (iii) turbinas-bombas híbridas; (iv) bombas de turbina de agua; (v) tubulares turbinas de hélices múltiples; (vi) turbinas de corriente de agua; (vii) integraciones genéricas; y (viii) otros dispositivos. Figura 1.1 muestra la clasificación de las de bombeo hidroeléctrico (HPP).

Figura 1.1 Clasificación de las tecnologías de bombeo hidroeléctrico (HPP)



Nota: Intriago et al., (2019)

Su marco temporal y presencia en todo el mundo, así como algunas de sus propiedades técnicas, se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1 Propiedades técnicas

Table 1. Summary of HPP technologies.

Class	Technology	First Record	Last Record	Reported Devices	Nr. of Countries	Prime Mover	Pumping Device	Pumping Principle	Integration	Required Head	Location in Water
Manometric pumps	Spiral pump	1746	2018	192	19	Waterwheel	Spiral pipe	PD	DA, CS	ZH	SS
	Coil pump	1778	1997	14	8	Waterwheel	Coil pipe	PD	DA	ZH	SS
	Helix pump	1987	2017	27	12	Axial-flow propeller	Helix pipe	PD	DA	ZH	SS
Hydro-pneumatic water lifters	Hydraulic ram pump	1796	2017	~6840	42	Compressed air	HT, SARP	PD	VS, Diaphragm	LH	OS, SS, SU
	Lambach pump	1880s	1961	35	3	Compressed air	SARP, DARP	PD	PS	LH	OS
	Hydrautomat	1920s	2013	13	6	Compressed air	HT	PD	VS	LH	SU
	Cherepnov water lifter	1960	1996	6	5	Compressed air	HT	PD	VS	LH	OS
	High lifter	1984	2016	4	1	Compressed air	SARP	PD	PS	LH	OS
	Aerohydraulic water lifter	1998	1998	4	1	Compressed air	HT	PD	VS	LH	SS
Hybrid turbine-pumps	Hydropulsor	1909	1912	5	2	Turbine-pump impeller	Turbine-pump impeller	VH	Integrated impeller	LH	OS
	Hydraulic transformer	1940	1999	12	1	Turbine-pump impeller	Turbine-pump impeller	VH	Integrated impeller	LH	OS
Water turbine-pumps	Hydraulic converter	1921	1921	1	1	Axial turbine	CP	VH	CS	LH	SU
	Chinese water turbine-pump	1954	2007	~81500	15	Kaplan turbine	CP	VH	CS, TS	LH, MH	SU
	Globe case coaxial water turbine pump	1999	2014	4	1	Kaplan turbine	CP	VH	CS	LH	OS
	Vietnamese hydraulic pump	2009	2014	9	1	Kaplan turbine	CP	VH	CS	LH	SU
Tubular multi-propeller turbines	Plata pump	1972	1990	17	8	Multi-propeller turbine	SARP	PD	TS	ULH	SS
	Turbopump	1983	1992	~300	1	Multi-propeller turbine	SARP	PD	TS	ULH	SS
	Hydrobine	1998	2014	7	4	Multi-propeller turbine	SARP	PD	TS	ULH	SS

Continuación Tabla 1. 1 Propiedades técnicas

Class	Technology	First Record	Last Record	Reported Devices	Nr. of Countries	Prime Mover	Pumping Device	Pumping Principle	Integration	Required Head	Location in Water
Water current turbines	Garman turbine	1976	2018	69	6	3-bladed propeller turbine	CP	VH	TS	ZH	SS
	Tyson turbine	1982	2009	28	9	7-bladed turbine	DARP	PD	TS	ZH	SS
	Hydrokinetic linear turbine	1984	2017	13	4	Linear turbine	SARP	PD	Slider-crank	ZH	SS
	Markovic self-propelled pump	1993	2009	3	1	Mixed flow propeller turbine	SARP	PD	Slider-crank	ZH	SU
Generic integrations	Waterwheel-driven pump	1528	2018	139	19	Waterwheel	SARP, DARP, DP, CP	PD, VH	TS	ZH, LH	OS, SS
	Axial-flow turbine-driven pump	1851	2011	88	9	Axial-flow turbines (Kaplan, Tubular, Bulb, S-shape, Jonval, Girard)	DARP, CP, DP	PD, VH	CS, TS	LH	SS, SU
	Mixed-flow turbine-driven pump	1897	2005	18	4	Mixed-flow turbines (Francis, Samson, S. Morgan Smith, Leffel)	CP, DARP	PD, VH	CS, TS	LH	SS
	Tangential-flow turbine-driven pump	1900	2018	17	7	Tangential-flow turbines (Pelton, Turgo, Ghatta)	CP, Plunger pump, Progressive cavity pump, DP, SARP, DARP	PD, VH	CS, TS	HH	OS
	Pump-as-Turbine - Pump	1952	2018	47	10	Pump working in reverse	CP, DP	PD, VH	CS, TS	LH	OS
	Cross-flow turbine-driven pump	1979	2018	26	10	Cross-flow turbine (Michell – Banki, Ossberger, BYS)	CP, DP	PD, VH	CS, TS	LH	OS
Other devices	Bunyip pump	2006	2018	6	1	Rubber tire	SARP	PD	DA	LH	OS
	Filardo pump	2012	2013	5	1	Ribbon frond mechanism	Peristaltic pumping pipes	PD	DA	ZH	SU

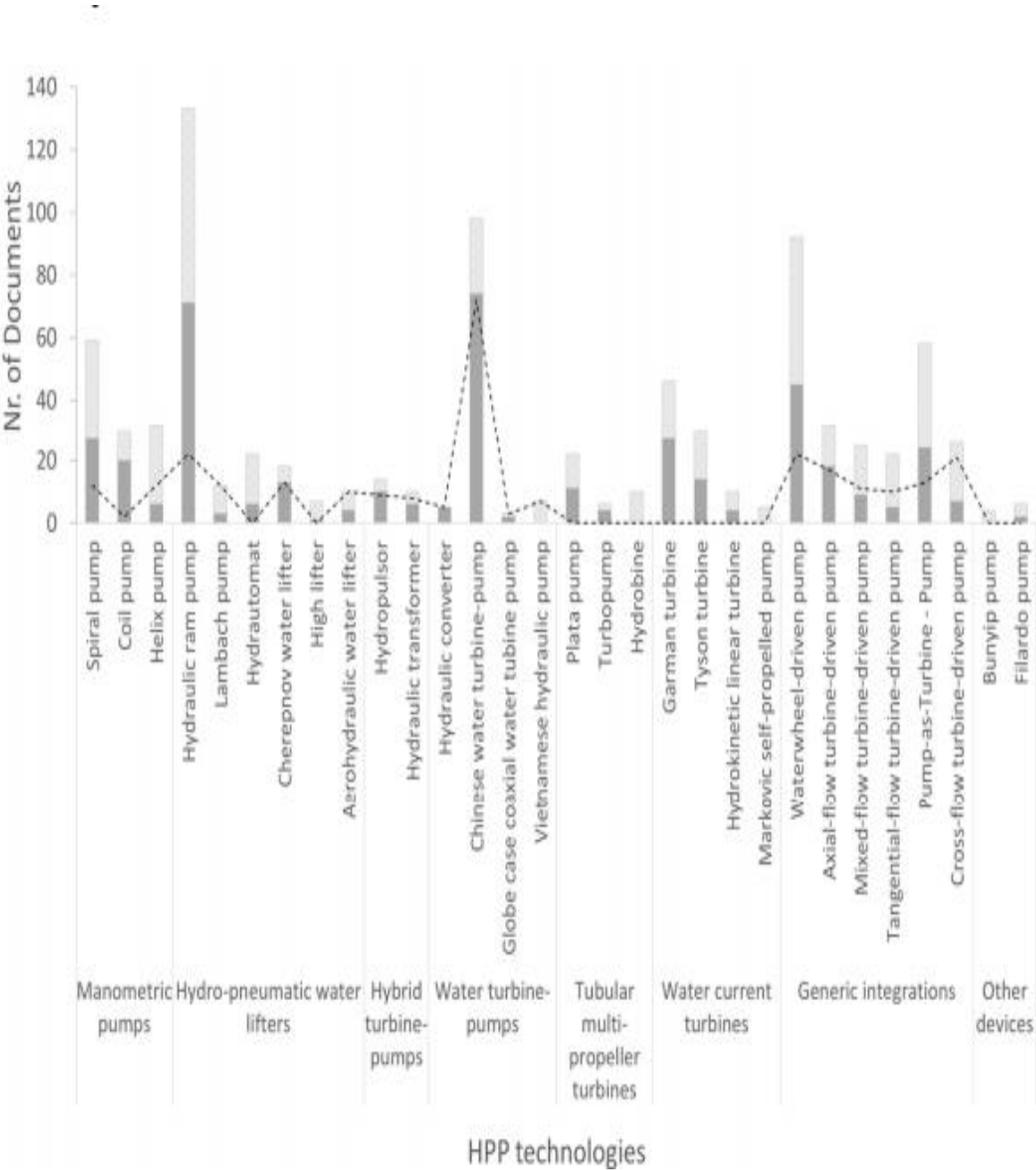
On pumping devices: HT, SARP, DARP, CP, and DP stand for hydraulic tank, single-acting reciprocating pump, double-acting reciprocating pump, centrifugal pump, and diaphragm pump, respectively. On pumping principles: PD and VH stand for positive displacement and velocity head, respectively. On integration: DA, CS, VS, PS, and TS stand for direct attachment, coaxial shaft, valve system, piston system, and transmission system, respectively. On required head: ZH, LH, MH, ULH, and HH stand for zero-head, low-head, medium-head, ultra-low-head, and high-head, respectively. On location regarding water: SS, OS, and SU stand for semi-submerged, on-surface, and submerged, respectively.

Nota: Intriago et al., (2019)

En el estudio realizado por Intriago et al., (2019), se seleccionaron y clasificaron un total de 854 documentos de diferente naturaleza, en 17 idiomas, ya sea en su totalidad o en partes de ellos. De estos, 418 y 436 corresponden a literatura científica y gris, de los cuales 156 y 125 son documentos en idioma no inglés, respectivamente. Como se

representa en la figura 1.2, el número y la distribución de estos documentos por tecnología HPP no son homogéneos ni siguen ningún patrón identificable.

Figura 1.2 Número de documentos seleccionados por tecnología HPP



Nota: Intriago et al., (2019)

Aunque aproximadamente la mitad del total de documentos seleccionados pertenece a la literatura científica, esta se concentra principalmente en solo tres tecnologías, a saber, CWTP, HRP y WDP (18%, 17% y 11%, respectivamente). En términos relativos, sin embargo, el convertidor Hidráulico, CWTP, CWL e Hydropulsor son los mayores poseedores de estas fuentes (100%, 76%, 72% y 71%, respectivamente). En el lado

opuesto, la HRP y la WDP son las principales portadoras de literatura gris (14% y 11%, respectivamente), aunque su mayor concentración relativa recae en la HHP, High lifter, bomba hidráulica vietnamita, Hydrobine, bomba autopropulsada Markovic y bomba Bunyip. De hecho, los cinco últimos solo existen en ese dominio de la información, es decir, no se reportan en absoluto en el ámbito científico (Intriago et al., 2019).

1.4 Principio de funcionamiento de la bomba manométrica

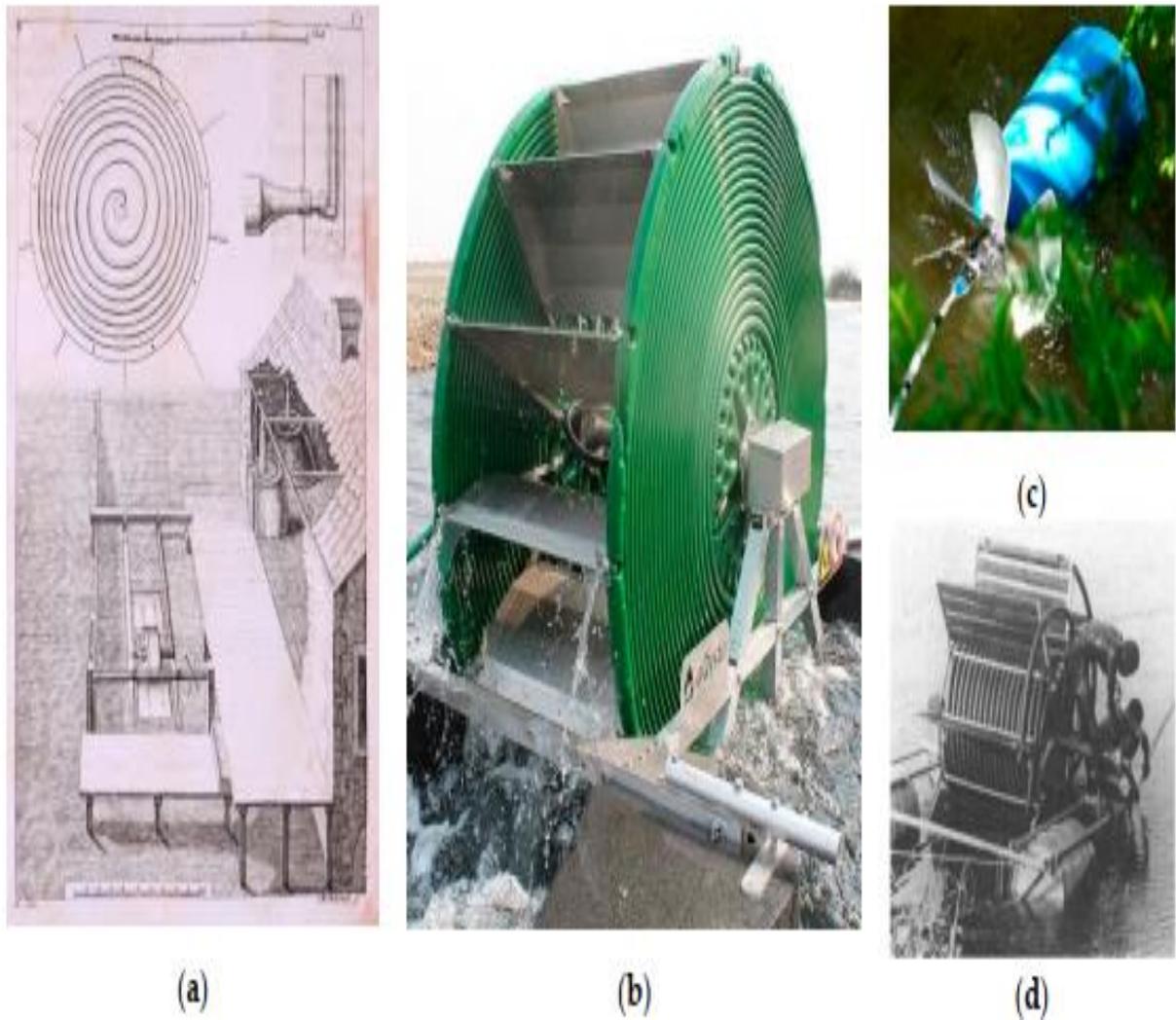
Estos dispositivos consisten en cualquier tipo de tubería curvada semisumergida que se enrolla alrededor de un punto o eje central fijo, que gira continuamente, por lo que alternativamente toma paquetes de agua y aire a través de un extremo abierto en cada revolución (Intriago et al., 2019). El otro extremo (es decir, la salida), que coincide con el centro/eje, se conecta a un accesorio giratorio estanco unido a un tubo fijo (Young, 2007). Reciben su nombre por su parecido con un manómetro en cascada herido, por lo que funcionan según su principio, donde la serie de bucles de la tubería actúan como manómetros separados entre sí por las columnas de aire atrapado (Stuckey and Wilson, 1981; Annabele, 1982). La altura de elevación total en la salida resulta de la suma de la diferencia de altura manométrica en cada bucle. Varios autores han estudiado a fondo la hidráulica de este principio de elevación de agua (Intriago et al., 2019).

La forma de la tubería curva puede ser plana, convolucionado en una superficie cilíndrica tridimensional, o en uno cónico. Además, en cuanto a la corriente de agua, el eje de la tubería puede ser transversal o axial. Estas diferentes formas dan lugar a bombas manométricas que adquieren varios nombres a lo largo de la literatura, a veces usándose indistintamente o incluso como sinónimos. Sin embargo, por convención del presente trabajo, las tuberías planas de flujo cruzado, no planas de flujo cruzado y no planas de flujo axial se denominarán bomba espiral hidráulica (HSP), bomba helicoidal hidráulica (HCP), y bomba helicoidal hidráulica (HHP), respectivamente (Intriago et al., 2019).

La Figura 1.3 representa diferentes tipos de bombas manométricas. Donde (a) Primera hidroeléctrica conocida-bomba espiral motorizada (HSP) (b) HSP moderna: bomba Barsha de aQysta (c) hidroeléctrica-bomba helicoidal motorizada (HHP) (d) Hydro-bomba de bobina accionada (HCP)

Los HSP, HCP y HHP generalmente aprovechan la energía requerida por medio de ruedas hidráulicas (frecuentemente de chorro), paletas radiales o axiales. -hélices de flujo, respectivamente. Por lo tanto, estos dispositivos generalmente no se basan en la cabeza potencial del agua sino en la velocidad de la corriente de agua (es decir, la cabeza cinética). Tanto la tubería curva como el motor primario se pueden unir uniéndolos o transmitiendo el movimiento de rotación de uno a otro a través de un eje o sistema de transmisión. Se puede montar más de un tubo curvo en todo el dispositivo (Kassab, et al., 2006; Jacobs, 2008; Quaranta and Michavila, 2018).

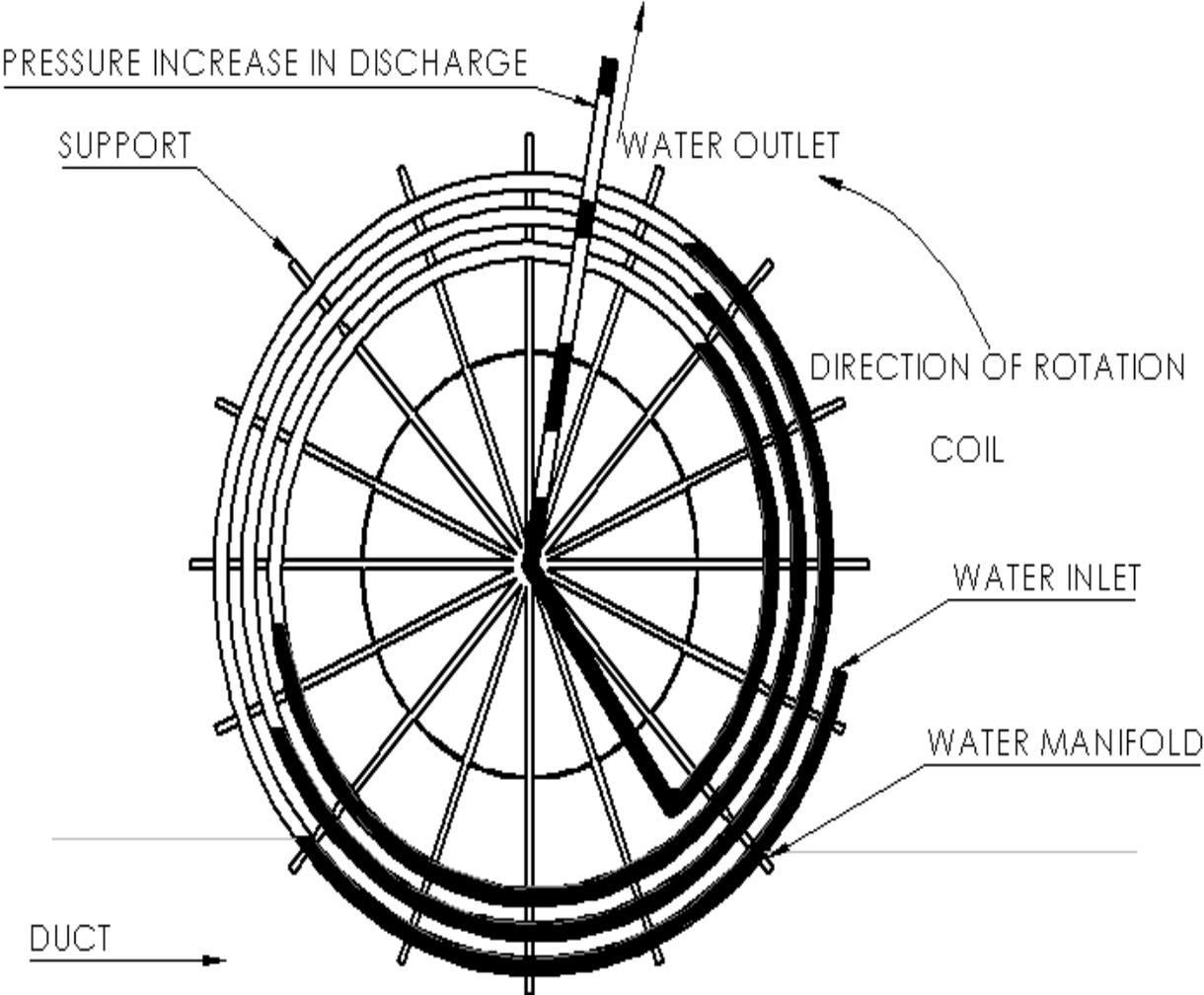
Figura 1.3 Diferentes tipos de bombas manométricas



Nota: Intriago et al., (2019)

La bomba de bobina, como se muestra en la Figura 1.4 es una bomba de desplazamiento positivo que usa su rotación para producir un diferencial de presión incremental para bombear líquidos. Esta bomba está compuesta por un tubo flexible, generalmente una manguera enrollada alrededor de una estructura cilíndrica sumergida en el fluido a bombear. La fuente de suministro de energía para operar esta bomba se obtiene generalmente de la energía cinética de la corriente que contiene el líquido a bombear, transformada a través de una turbina acoplada al marco principal de la bomba de bobina (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019).

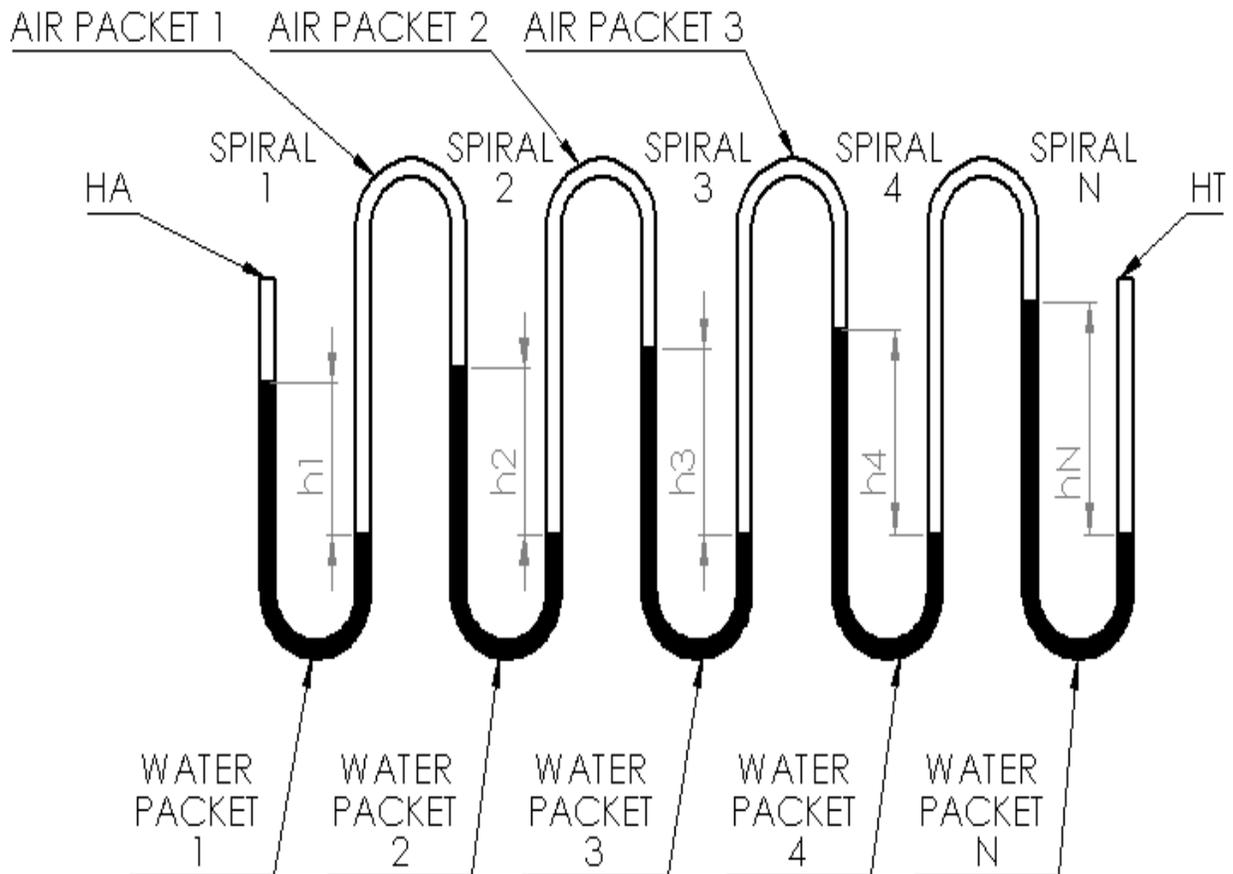
Figura 1. 4 Representación esquemática de una bomba de serpentín



Nota: (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019)

En el funcionamiento, las bombas de serpentín forman una serie de paquetes alternos de agua y aire que constituyen una secuencia de manómetros con diferenciales de presión. La alta presión de salida de la bomba es el resultado de la suma de estos diferenciales. Por lo tanto, en las bombas de serpentín, el número de capas de manguera, el número de columnas de agua, determina la cabeza de descarga neta (ver Figura 1.5)

Figura 1.5. Tapones de agua y aire dentro de manguera



Nota: (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019)

El modelo analítico de la bomba helicoidal para determinar el caudal y la carga neta de descarga fue propuesto por Hilton (1989) tal como se presenta en las Ecuaciones (1) y (2).

$$Q_p = N_s * \pi * r^2 * L_{w1} \tag{1}$$

$$H_p = H_T - H_A = \sum_i^N h_i \tag{2}$$

Donde Q_P es el caudal de salida del líquido, r es el radio de la tubería flexible, N_s es la velocidad de rotación del cilindro en ciclos por minuto y $LW.1$ es la longitud del primer paquete en la entrada de la bomba. Por lo tanto, el caudal volumétrico promedio de la bomba está definido por la sección transversal de la tubería flexible, la relación de sumersión definida por el primer paquete y la velocidad de rotación de la bomba. En la Ecuación (2), H_P es la cabeza de descarga, H_T es la cabeza de descarga neta absoluta, H_A es la presión atmosférica y h_i es el diferencial de presión producido para cada paquete de agua, para los N paquetes producidos dentro de la tubería flexible. Las longitudes de los paquetes de aire son el resultado de la trayectoria de la entrada de la bomba que gira sobre el nivel del agua. La presencia de paquetes consecutivos de agua y aire produce una entrega de líquido intermitente.

El volumen inicial de los paquetes de aire, específicamente para el primer serpentín, depende de la geometría del tambor, el diámetro interno de la manguera y el porcentaje sumergido de la bomba. Debido a que el paquete de aire está limitado por los paquetes de agua a su lado, se desarrollan diferentes presiones de aire. La presión del aire se puede estudiar utilizando una relación politrófica, es decir, $P_{V1,15} = \text{constante}$, donde P es la presión absoluta en el paquete de aire y V es el volumen del paquete.

A medida que los paquetes de aire se mueven desde la entrada hasta la salida de la bomba, la alta presión desarrollada reduce el volumen del paquete de aire y aumenta el volumen del paquete de agua. Este cambio de volumen se puede calcular usando la relación politrófica mencionada a continuación como se establece en la Ecuación (3). Cuando el paquete de agua alcanza la corona del serpentín, se puede producir un derrame del paquete de agua eliminando el paquete de aire entre ellos. Los paquetes de aire que desaparecen implican la pérdida de los diferenciales de presión producidos en el serpentín, lo que provoca una reducción de la presión de salida.

$$H_A * L^{1.15}_A = H_n * L^{1.15}_{A,n} \quad (3)$$

Donde H_n es la altura de presión absoluta en el serpentín n , $L_{A,n}$ es el paquete de longitud de aire en el serpentín n , H_A y L_A son la altura y la longitud del espacio ocupado

por el aire en la entrada de la bomba. Por lo tanto, el cambio de longitud del paquete de aire entre diferentes bobinas se puede determinar mediante la Ecuación (4).

$$L_A - L_{A,n} = L_A * \left(1 - \frac{H_A^{0.87}}{A_n}\right) \quad (4)$$

El patrón de flujo establecido en este tipo de bomba se caracteriza por una secuencia de paquetes de aire y agua producidos durante la operación de la bomba. Este flujo de agua discontinuo generalmente no preocupa si la instalación es para almacenamiento de agua como es el caso en la mayoría de las comunidades rurales. Para diseñar correctamente una bomba de serpentín, se necesita una secuencia de cálculos para cumplir con los requisitos dados. Las relaciones analíticas más importantes se expresan a continuación:

$$L_{BB} - L_{AA} = 2 * \pi * R \quad (5)$$

El caudal de salida de la bomba es una función de la velocidad angular del tambor, la sección transversal de la manguera AT y la relación de inmersión, como se muestra en la Ecuación (6)

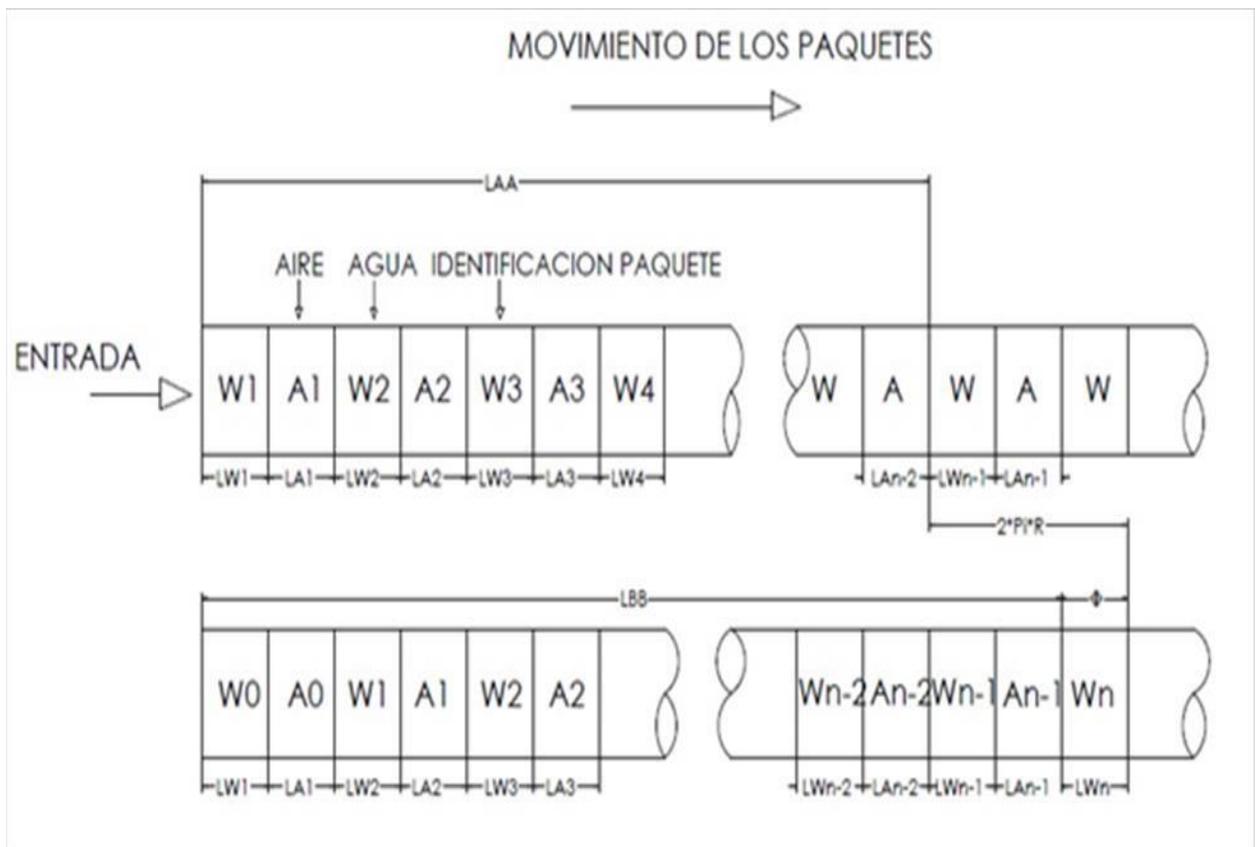
$$Q_D = L_{w1} * A_T * rpm \quad (6)$$

Finalmente, el torque M requerido bajo las condiciones de presión establecidas se calcula usando la Ecuación (7) como sigue.

$$M = (H_D - H_A) * A_T * R \quad (7)$$

Donde H_A es la presión atmosférica, H_D es la presión total de salida de la bomba y R es el radio del tambor. Ver Figura 1.6.

Figura 1.6 Longitud de distribución de tapones en manguera



Nota: (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019)

1.5 Utilización de la bomba manométrica de espiral

La Barsha Pump, son bombas manométricas de espiral de riego sostenible, de bajo costo y bajo mantenimiento que permite a las comunidades rurales de aumentar el rendimiento de los cultivos. La Barsha Pump es un nuevo producto que se basa en un diseño muy antiguo y es esencialmente una rueda de agua en una plataforma flotante, amarrada en un río o canal que fluye cerca de los campos. El agua en movimiento gira la rueda que a su vez utiliza un mecanismo espiral para comprimir el aire que conduce el agua hasta los campos, a través de una manguera conectada. Dependiendo del suelo, el cultivo, las condiciones climáticas y la técnica de riego, una bomba Barsha puede regar hasta 2 hectáreas de tierra. La bomba se puede combinar con otras tecnologías complementarias, como los sistemas de riego por goteo o por aspersión, que ayudan a irrigar el área más grande posible (Barsha Pump, 2021).

La tecnología es diseñada y construida para brindar importantes beneficios para los usuarios y el medio ambiente. Según sus diseñadores, la Barsha Pump es una alternativa

sostenible y económica comparada con otras soluciones de riego tales como el bombeo diesel y solar. Resulta de un 70% más barata que una bomba convencional de diesel/ gasolina y proporciona un retorno de la inversión en el plazo de un año de uso. No genera emisiones y consiste en una pieza móvil que puede ser construida a partir de materiales disponibles localmente y requiere muy poco mantenimiento (Barsha Pump, 2021).

La bomba facilita el acceso al agua y el desarrollo de una actividad agrícola rentable y amigable con el medio ambiente, permite ahorrar más del 70% de los costos de riego para los agricultores, en comparación con las bombas convencionales basadas en combustibles fósiles. Además, no genera emisiones. Según sus diseñadores, tiene costos de operación cero. Consiste en una pieza móvil que puede ser construida a partir de materiales disponibles localmente. La bomba Barsha es una alternativa sostenible y económica comparada con otras soluciones de riego tales como el bombeo diésel y solar. Si bien la inversión inicial de una bomba alimentada con diésel es baja, induce costos de operación y mantenimiento, con reparaciones constantes y reabastecimiento de combustible. Según sus diseñadores, la bomba Barsha resulta de un 70% más barata que una bomba convencional de diésel/ gasolina. Además, proporciona un retorno de la inversión en el plazo de un año de uso en comparación con los 10 años de las bombas convencionales (Barsha Pump, 2021) ...

1.5.1 Aplicaciones de la bomba manométrica de espiral

En muchos países se utilizan las bombas manométricas de espiral la Figura 1.7, muestra la distribución a nivel mundial.

Detallándose algunas aplicaciones específicas a continuación:

- Colombia (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019).

Con base en diferentes prototipos a escala de laboratorio desarrollados en la Universidad Industrial de Santander en la Facultad de Ingeniería Mecánica, se propone, implementa y prueba un serpentín de bomba en una comunidad rural de Santander, Colombia. La bomba está compuesta por una estructura metálica para albergar todos los elementos de la bomba, incluidos los flotadores. Este marco tiene un amortiguador de impacto de parachoques metálico en la parte delantera para atenuar la energía de impacto de

cualquier material arrastrado por la corriente. Además, la bomba de serpentín también se compone de las siguientes partes:

Figura 1.7 Mapeo mundial de tecnologías HPP por país.

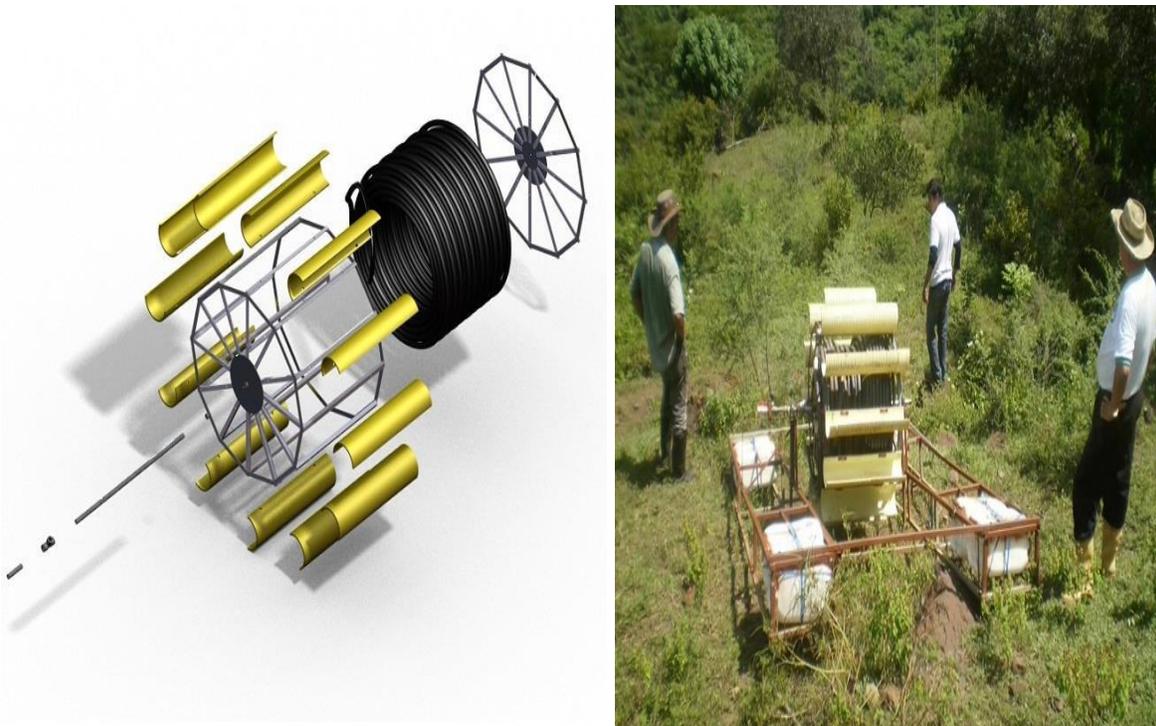


Nota: Intriago et al., (2019)

- ✓ Un serpentín de tubería flexible: Esta parte es la encargada de generar los paquetes de agua y aire necesarios para el líquido. Este serpentín se puede construir utilizando tubería de riego, que es una opción económica fácilmente disponible en áreas rurales.

- ✓ Álabes de turbina: Este componente transforma la energía cinética de la corriente en energía mecánica rotacional. Estas palas se pueden construir utilizando cortes transversales de tubos de PVC que son adecuados, baratos, comunes y resistentes a la corrosión.
- ✓ Conexión de tubería de junta giratoria: esta pieza proporciona un par de estanqueidad entre la manguera de descarga estacionaria y la bobina giratoria. A continuación, en la Figura 1.8, se muestra una representación esquemática de una bomba de serpentín y una imagen real de la bomba implementada, en vista de despiece.

Figura 1.8 Diseño esquemático de instalación e implementación de una bomba de espiral



Nota: (Quiroga, Tschiersch, and Bohórquez, 2019).

Este prototipo se utilizó para validar el proceso de diseño y satisfacer las necesidades de agua de esta comunidad. La bomba se instaló en un río caudaloso que actúa como fuente de energía de tal manera que cumple con la energía requerida para bombear agua desde el nivel del río hasta un tanque de almacenamiento ubicado 70 m cuesta arriba del arroyo.

Otro Proyecto fue el diseño y posterior rediseño de un sistema de bombeo usando bombas con energía alternativa para proveer de agua a una zona agropecuaria del municipio de Socorro en Colombia, (Camacho et al, 2010; Sanmiguel. y Machuca, 2012; Pellicier, 2014).

- España (Pellicier, 2014).

La ciudad de Huesca por ser una zona rica en acequias. localizada en el pequeño municipio de Quicena situado a 3,2 km de la capital oscense. Esta parcela está ubicada en el paraje La Pardina y se accede al norte de esta por la Travesía Castillo de Monte Aragón. La parcela con un índice de regadío igual a 0, lo que significa que es explotada en régimen de secano y tiene una superficie de 3,944 ha catalogadas como terreno arable

- Malasia (Ramli, Basar and Razik, 2013; Pellicier, 2014).

Otro proyecto realizado en Malasia de revisión y construcción de la Sling-Pump para observar la viabilidad y eficacia de su aplicación en las áreas remotas de la costa este de la península de Malasia, donde el acceso a la red eléctrica es complicado

- Perú (Castro y Martínez 2017)

La bomba espiral con diámetro exterior de 1.40 m fue instalada en diferentes sitios en el canal principal de irrigación. El canal tiene 1.50 m de ancho y la profundidad del agua oscila entre 1.15 y 1.05 m. A una velocidad de aproximadamente 1.83 m/s, aproximadamente 3.02 m³/s de agua pasaban a través del canal de sección rectangular.

La bomba está parcialmente sumergida en la corriente y la rueda es girada por el flujo de la corriente gracias a las 8 paletas de triplay reforzado instaladas a la rueda, de manera que los tapones alternativos de agua y aire son recogidos en el tubo de captación. Bomba.

La bomba construida e instalada sobre el Canal Margen Izquierda, sector Realengal, impulsa 7.71 litros/minuto a una altura de 3 m sobre el nivel de agua, 7.2 litros/minuto a una altura de 5 m. sobre el nivel de agua y 6.86 litros/minuto a una altura de 9 m. sobre el nivel de agua; dejando establecido que la altura de agua llega hasta los 11 metros de nivel de agua, todos ellos con un giro de 13 revoluciones por minuto.

- Zambia (Thompson et al, 2011)

La primera bomba de serpiente de Zambia pudo entregar 30 L/min a una altura de aproximadamente 12 m. Tres días después de que el equipo de estudiantes regresara a Seattle, los tornillos de la plataforma flotante se aflojaron y la bomba falló. Quedó claro que los materiales (p. ej., madera, tornillos de fijación, discos de plástico) no eran lo suficientemente resistentes para soportar el entorno del río Zambezi. Además, el diseño unilateral (con la bomba helicoidal fuera del pontón) hizo que la bomba se tambaleara y las pulsaciones del agua provocaron un desgaste adicional en los accesorios de la tubería, debilitándolos. La Figura 1.9 muestra la primera prueba de la bomba.

Figura 1.9 Prueba de la primera bomba de bobina en Chirundu, Zambia



Nota: (Thompson et al.,2011)

Para determinar el almacenamiento máximo requerido, se asumió una distribución normal para el uso de fuentes por parte de la población de servicio de 200 junto con una demanda diaria per cápita de 50 L. La demanda y el cambio en el almacenamiento a lo largo del día e indica que 6000 L de almacenamiento pueden satisfacer adecuadamente la

demanda durante las horas pico. Se compraron un tanque de almacenamiento de agua de 4000 L y otro de 2500 L por \$650 USD y se usaron para abastecer la fuente.

En la actualidad todavía hay muchas más personas que usan el río que las que usan las fuentes porque la demanda de agua de cientos de residentes excede lo que la bomba puede proporcionar. Como resultado, hay planes para agregar otra bomba de serpentín y construir depósitos adicionales. También ha habido varias solicitudes de bombas de bobina por parte de comunidades vecinas que están principalmente interesadas en las bombas para el riego de cultivos durante la estación seca. Esta demanda potencial también es prometedora para el desarrollo futuro de una pequeña empresa comercial.

La bomba de espiral fue una solución adecuada para la comunidad porque podía ser alimentada por el río, hecha con materiales locales y fácil de mantener por parte de los residentes. La bomba también pudo satisfacer las necesidades diarias de agua de hasta 200 residentes y demostró ser capaz de entregar más de 30 l/min de agua bajo cabezas de presión de hasta 12 m. El costo de \$3000 para la bomba puede ser una barrera para la adopción por parte de las comunidades más pobres. Sin embargo, estos costos podrían reducirse con economías de escala si se fabrican muchas bombas. Para que la bomba de serpentín sea realmente sostenible en el tiempo, se debe tener especial cuidado en la fabricación de la junta giratoria. También se debe realizar un monitoreo diario de la bomba y el sistema de anclaje para detectar la acumulación de desechos del río.

1.6 Diseño conceptual de bombas manométricas espirales

Para el diseño de diferentes tipos de bomba manométricas espiral según Gutiérrez y Tafur (2019) se deben considerar los siguientes conceptos:

- **Concepto N° 1: Bomba tipo espiral de tambor**

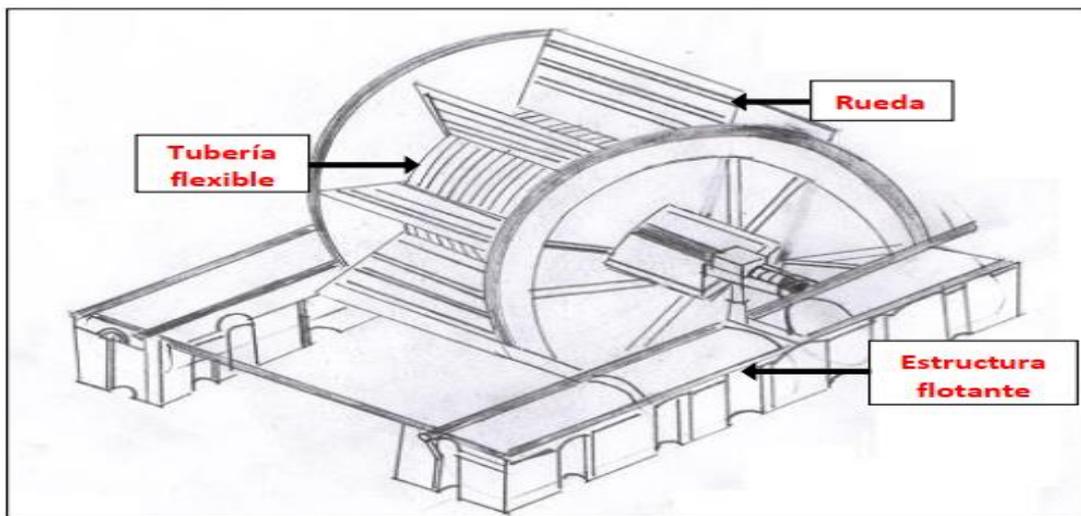
Este concepto es una adecuación de Fraenkel (1986). Es una bomba tipo espiral que cuenta con un tambor cilíndrico en el cual se enrolla la tubería flexible. El tambor está acoplado a la rueda hidráulica la cual le trasmite la energía para que este se mueva. Cuenta con una estructura flotante donde se instala el sistema. Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 1.2. El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.10.

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas Bomba tipo espiral de tambor

Ventajas	Desventajas
Alto rendimiento. Aprovecha al máximo la energía cinética del agua. Puede flotar establemente en el agua.	Altura de bombeo limitada. El tambor debe ser de mayor longitud para poder bombear agua a grandes desniveles

Nota: a partir de (Gutiérrez y Tafur,2019)

Figura 1.10 Bomba tipo espiral de tambor



Nota: (Gutiérrez y Tafur,2019)

- **Concepto N° 2: Bomba tipo espiral por cadena**

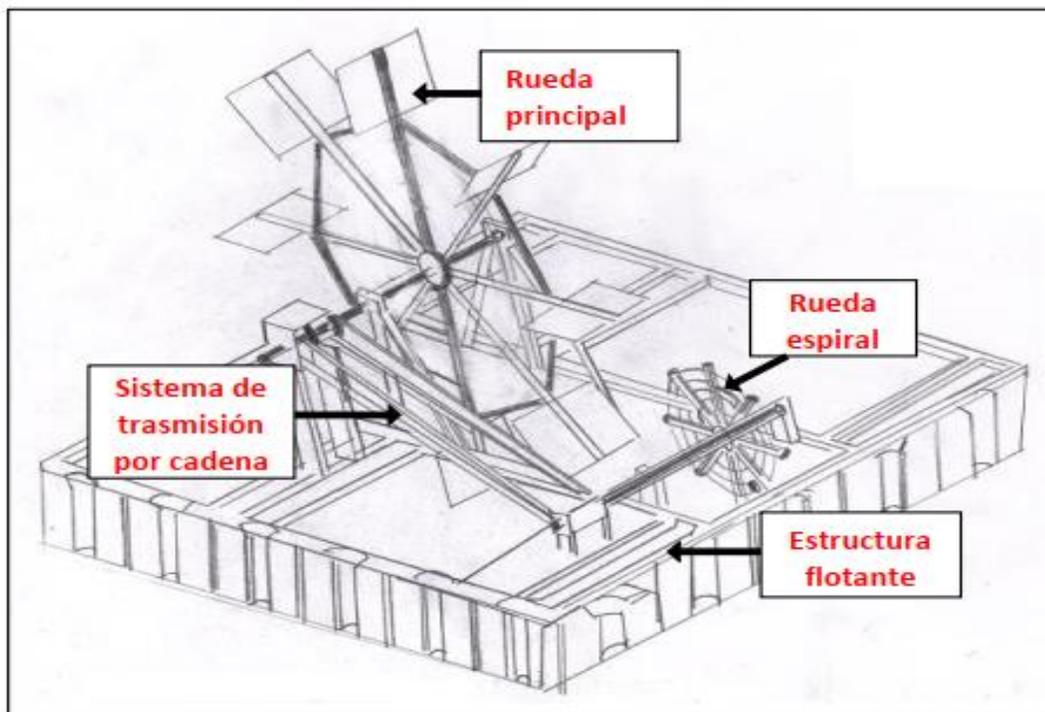
Este concepto es una adecuación de Thompson et. al. (Thompson et. al., 2011). Es una bomba tipo espiral que cuenta con dos ruedas hidráulicas, los engranajes del conductor están unidos al eje de la rueda principal (la que genera el movimiento), los engranajes accionados están unidos al eje sólido que está conectado a la rueda espiral (de una capa de espiras) por medio de transmisión por cadena y cuenta con una estructura flotante donde se instala este sistema. Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 1.3 . El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.11.

Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de la Bomba tipo espiral por cadena

Ventajas	Desventajas
<p>El agua se puede levantar a una altura más alta.</p> <p>No se requiere sistema de drenaje para la transferencia de agua.</p> <p>El mantenimiento se realiza de manera independiente</p>	<p>Gasto del proyecto demasiado alto.</p> <p>A medida que la velocidad del río varia afecta la velocidad general de la rueda, la descarga de la bomba y para esa dificultad se requiere una caja de engranajes.</p> <p>Existe perdidas de energía por el sistema de trasmisión.</p>

Nota: a partir de (Gutiérrez y Tafur, 2019)

Figura 1.11 Bomba tipo espiral con sistema de trasmisión por cadena.



Nota: (Gutiérrez y Tafur, 2019)

- **Concepto N° 3: Bomba tipo espiral simple**

Este concepto es una adecuación de Praveen & Harshal (Praveen & Harshal, 2016). Es una bomba tipo espiral que consta de una capa de espiras la cual tiene rayos como soporte, para la trasmisión de movimiento se les acopla a estos rayos unas palas

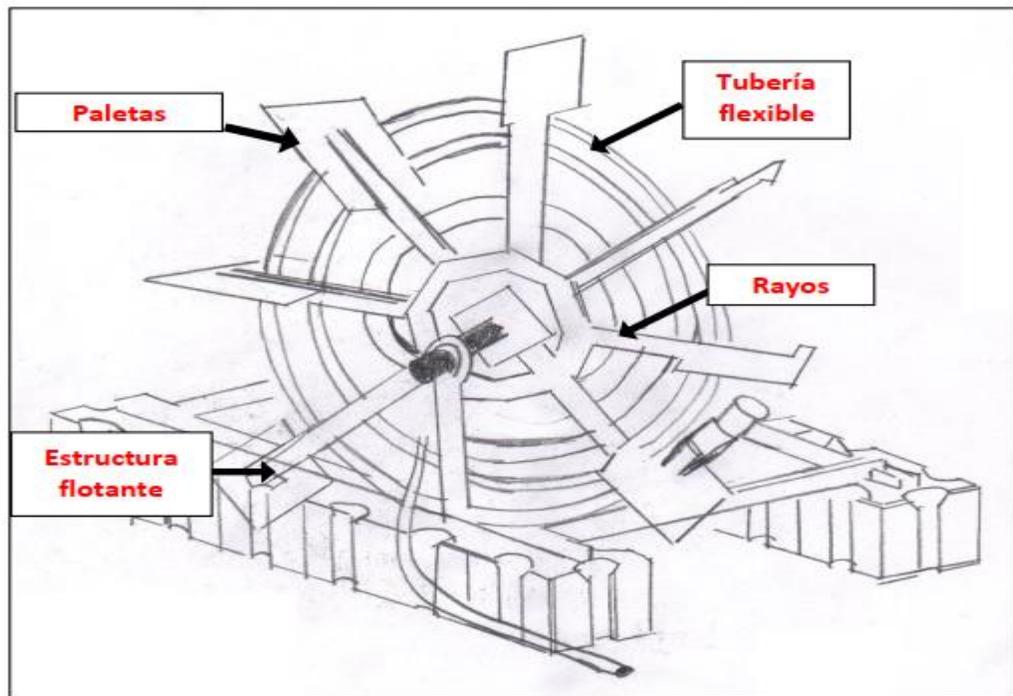
rectangulares y cuenta con una estructura flotante donde se instala el sistema. La tabla 1.4 muestra la ventajas y desventajas de este tipo de bomba. El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.12.

Tabla 1.4 Ventajas y desventajas de la bomba tipo espiral simple

Ventajas	Desventajas
Fácil construcción. Muy económica.	Altura de bombeo limitada. Poca estabilidad en el agua

Nota: a partir de (Gutiérrez y Tafur, 2019)

Figura 1.12 Bomba tipo espiral simple



Nota: (Gutiérrez y Tafur, 2019)

- **Concepto N° 4: Bomba tipo espiral con rueda hidráulica**

Este concepto es una adecuación de Thompson et. al. (Thompson et. al., 2011). Es una bomba tipo espiral que cuenta con una capa de espiras soportada por una estructura que se encuentra acoplada al eje de la rueda hidráulica (la que genera el movimiento).

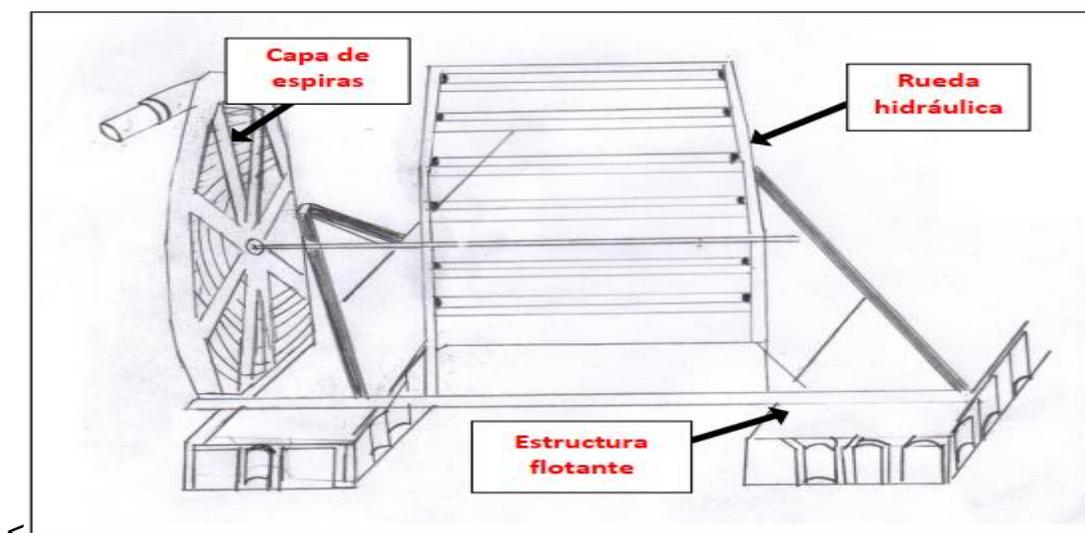
Cuenta con una estructura flotante donde se instala el sistema. Sus ventajas y desventajas se muestran en la tabla 1.5. El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.13.

Tabla 1.5 Ventajas y desventajas de la bomba tipo espiral con rueda hidráulica

Ventajas	Desventaja
Fácil mantenimiento. Menor costo de inversión	Descompensación en la estructura. Vibración excesiva en la máquina. Desgaste en los accesorios de la tubería.

Nota: a partir de (Gutiérrez y Tafur, 2019)

Figura 1.13 Bomba tipo espiral con rueda hidráulica



Nota: (Gutiérrez y Tafur, 2019)

- **Concepto N° 5: Bomba tipo espiral con una capa de espiras**

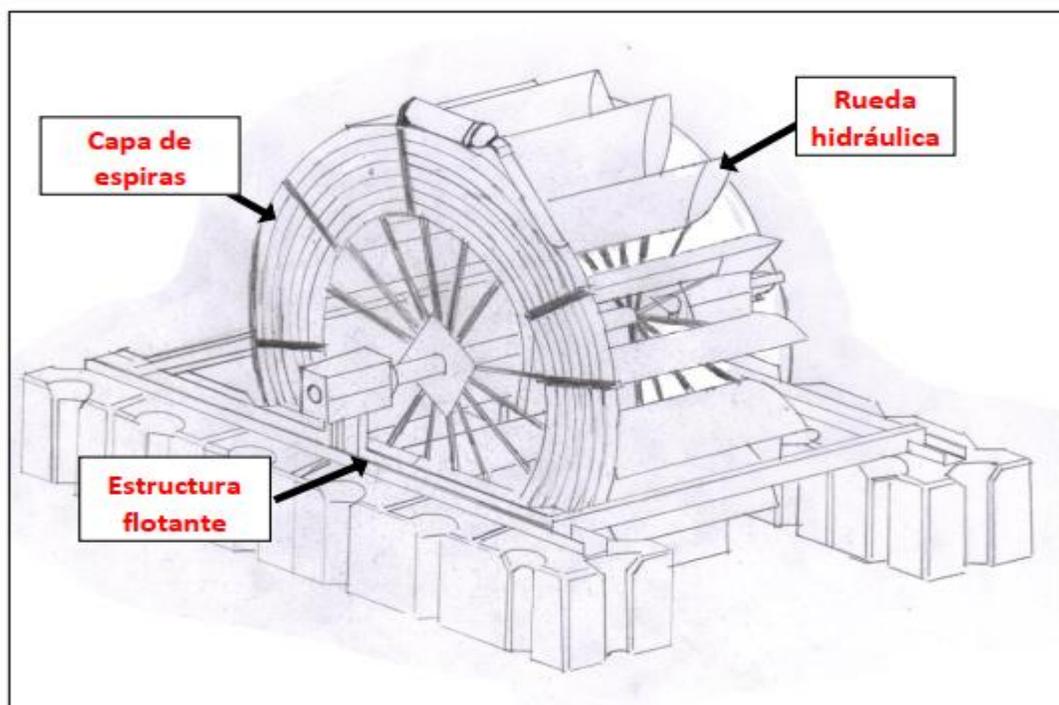
Este concepto es una adecuación de Da Rocha (Da Rocha. J, 2014). Es una bomba tipo espiral que cuenta con una capa de espiras acoplada a la rueda hidráulica (la que genera el movimiento), esta capa de espiras gira al mismo tiempo que la rueda, logrando bombear el agua. Cuenta con una estructura flotante donde se instala el sistema. Sus ventajas y desventajas son mostradas en la tabla 1.6. El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.14.

Tabla 1.6 Ventajas y desventajas de la bomba tipo espiral con una capa de espiras

Ventajas	Desventajas
Fácil mantenimiento. Estabilidad en el agua.	Descompensación en la estructura. Desgaste de accesorios.

Nota: (Gutiérrez y Tafur, 2019)

Figura 1.14. Bomba tipo espiral con una capa de espiras



Nota: (Gutiérrez y Tafur, 2019)

- **Concepto N° 6: Bomba tipo espiral con dos capas de espiras**

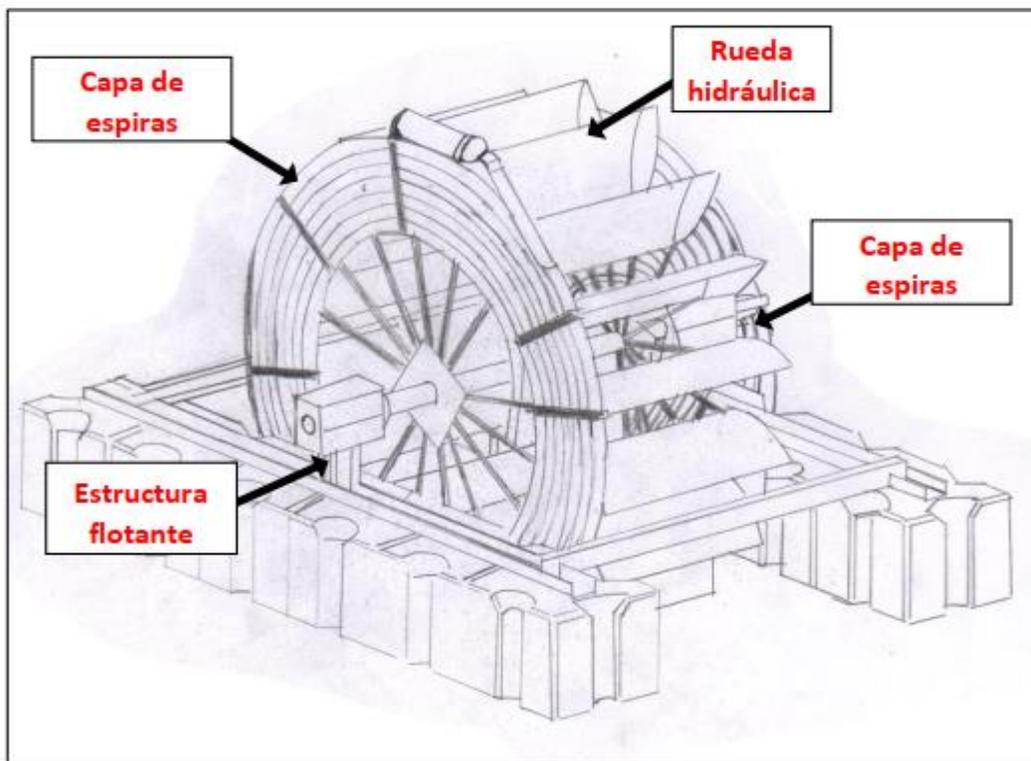
Este concepto es una adecuación de Da Rocha (Da Rocha. J, 2014). Es una bomba tipo espiral que cuenta con dos capas de espiras acoplada a cada lado de la rueda hidráulica (la que genera el movimiento), estas capas de espiras giran al mismo tiempo que la rueda, logrando bombear el agua. Cuenta con una estructura flotante donde se instala el sistema. La tabla 1.7 muestra las ventajas y desventajas de esta bomba. El diseño de este tipo de bomba espiral se muestra en la Figura 1.15.

- **Tabla 1.7** Ventajas y desventajas de la bomba tipo espiral con dos capas de espiras

Ventajas	Desventajas
Fácil mantenimiento. Estabilidad en el agua. No existe descompensación en la estructura	Costo elevado

Nota: a partir de (Gutiérrez y Tafur,2019)

Figura 1.15 Bomba tipo espiral con dos capas de espiras



Nota: Gutiérrez y Tafur (2019)

1.6.1 Selección de materiales

La selección de materiales para la bomba, son todas las partes que la conforman, que uniendo cada una de sus partes forman una sola pieza, para soportar todas las cargas a las que han sido proyectadas, sin desplomarse.

- **Selección de materiales para la estructura.**

La estructura para la bomba en espiral es un conjunto de elementos resistentes para mantener la forma y cualidades a lo largo del tiempo, bajo la acción de las cargas y agentes exteriores a los que ha de estar sometida. Para poder tener un acierto en la estabilidad de la estructura de la bomba, es imprescindible entender el funcionamiento de la estructura, conocer la disposición estructural, las solicitaciones que le llegan y el material utilizado. La estructura, en su mayoría es de aluminio, este material se lo utiliza en la bomba Barsha por ser liviano y resistente.

- **Selección de materiales para las paletas**

El material que se utiliza en las paletas, para generar el movimiento generalmente es de plástico, acero negro o aluminio, ya que son materiales livianos y resistentes.

- **Selección de materiales para espiras.**

El material que se utiliza generalmente para las espirales de la bomba Barsha es plástico o manguera de riego.

- **Selección de materiales para el sistema de flotación.**

En los modelos ya construidos de la bomba Barsha se ha utilizado fibra de vidrio para la elaboración del sistema de flotación

- **Selección del material para el sistema de entrada de agua.**

Para la entrada de agua o boca de entrada de la bomba Barsha se utiliza el mismo material que en las espiras, con la diferencia que tiene un diámetro mayor al diámetro de las espirales. Siendo de suma importancia ya que es por donde ingresa el agua y el aire alternadamente, para la bomba.

- **Selección del material para la descarga.**

Para el material de descarga se utiliza manguera de riego común, solo se tiene que tener en cuenta el diámetro de salida de la bomba, ya que es la encargada de llevar el agua desde la articulación hidráulica hasta el punto de almacenamiento del líquido.

- **Criterios de diseño de la Bomba-Barsha.**

La bomba Barsha debe ser diseñada para tres situaciones distintas que se puedan presentar para su funcionamiento, como es para canal, río poco profundo y río profundo, En la tabla 1.8. se detalla las dimensiones y el peso.

Tabla 1.8 Dimensiones y el peso

Dimensiones y peso.

		Largo	Ancho (sin manijas instaladas)	Alto	Peso
Canal	Estrecho	1785mm	1440mm/1840mm	1500mm	75kg
	Amplio	1785mm	1640mm/2040mm	1500mm	80kg
Río poco profundo	Estrecho	1785mm	1440mm/1840mm	1590mm	80kg
	Amplio	1785mm	1640mm/2040mm	1590mm	85kg
Río Profundo	Estrecho	2800mm	1550mm/1840mm	1590mm	92kg
	Amplio	2800mm	1750mm/2040mm	1590mm	97kg

Nota: Gutiérrez y Tafur (2019)

Con los datos descritos en la tabla 1.8, se puede seleccionar el alto de la bomba de acuerdo a las especificaciones del lugar.

1.7 Conclusiones parciales.

1. En el capítulo se exponen los diferentes diseños de bombas de tipo espiral y sus principales características.
2. En las referencias revisadas, todos los autores concuerdan en la facilidad de construcción, bajo costo y alta aplicabilidad de las bombas de tipo espiral, así como su bajo impacto al medio ambiente.
3. La bomba con espiral simple puede ser el prototipo a construir para estudiar el comportamiento del equipo en condiciones de explotación.

4. No existe un criterio único, en la literatura revisada, de los modelos para el dimensionado y cálculo de las bombas de tipo espiral.

Capítulo 2. Metodología de cálculo de la Bomba manométrica en espiral

2.1 Introducción

El diseño de la bomba parte de las necesidades de flujo de agua necesario (Q [m^3]) y altura (H [m]) a la que se debe enviar el fluido. Tal como se explicó en el capítulo anterior, este tipo de bomba utiliza la energía de la corriente del río o canal para funcionar, en tal sentido un dato importante en el diseño es la velocidad de la corriente (v_r [m^3]) que moverá la rueda hidráulica.

Independientemente de la forma que tenga el diseño de la bomba, son necesarios calcular o asumir algunos parámetros que definen el funcionamiento de esta. Dentro de los parámetros a asumir están: el radio exterior de la rueda hidráulica (R_e), diámetros exteriores (d_{ext}) e interior (d_{int}) de la manguera a utilizar en los espirales de la bomba, la cantidad de paletas ($cp.$) que se utilizaran.

Para el caso que nos ocupa, se considera que las paletas serán rectas, que la espiral ocupará el 60% del área de la rueda hidráulica y que la altura que se sumerge la rueda es el 40% del radio exterior de esta. Estos parámetros son recomendaciones de estudios y diseños consultados en la bibliografía que se refiere en este trabajo.

2.2 Modelo de cálculo

2.2.1 Determinación del número de espiras (n_e):

Para el cálculo del número de espira que se necesitan para cumplir con las demandas de flujo y carga, se debe determinar la cantidad de agua y de aire que entra en la espiral para cada vuelta de la rueda. Para ello, a partir de saber que el 40% de la rueda está sumergida, se utiliza la figura 2.1 para determinar las dimensiones y ángulos necesarios para el cálculo.

h : altura sumergida de la rueda hidráulica (m).

$$h = 0.4 * R_e \quad (1)$$

R_p : radio primitivo (m)

$$R_p = R_e - d_{int} / 2 \quad (2)$$

α : Ángulo del sector de tubería sumergido.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{\sqrt{(R_p^2 - (R_e - h)^2)}}{(R_e - h)}\right) \quad (3)$$

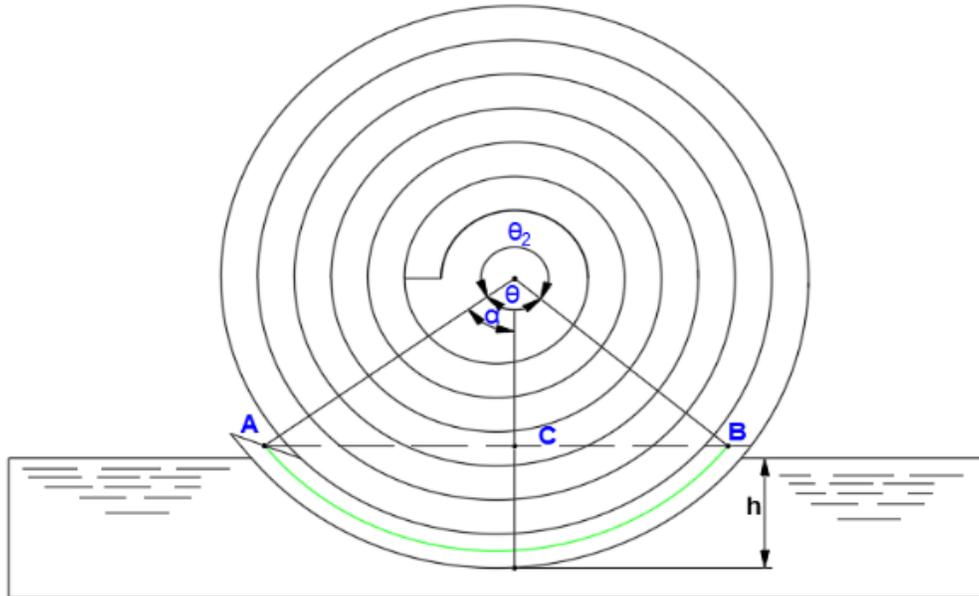
S_1 : longitud del arco sumergido (m)

$$S_1 = 2 * R_p * \alpha \quad (4)$$

$S_2 =$: arco con aire (m)

$$S_2 = 2 * R_p * (\pi - \alpha) \quad (5)$$

Figura 2.1. Elementos geométricos de la espiral



Nota: (Sanmartín, 2022).

Considerando el proceso de bombeo isotérmico, se calcula el número de espiras (n_e) necesarias para garantizar la altura de carga a la salida de la espiral (h_n). La bibliografía recomienda incrementar un 20% la cantidad de espiras calculadas.

$$h_n = (p_a + 2 * R_e) * 2 * R_e / (p_a + H) \quad (6)$$

$$p_a = 1.2 * 2 * H / (2 * R_e + h_n) \quad (7)$$

p_a : presión atmosférica (Pa)

2.2.2 Cálculo del volumen de aire y agua en la espiral de la bomba.

Para calcular el volumen total que ocuparía el líquido (V_l) y el aire (V_a) en la espiral de la bomba, se divide la carga H por la longitud total del arco ($s_1 + s_2$), determinándose la constante adimensional K :

$$K = H / (s_2 - s_1) \quad (8)$$

entonces:

$$V_l = \pi * (d_{int}/2)^2 * K * s_1 \quad (9)$$

$$Va = \pi * (dint/2)^2 * K * s_2 \quad (10)$$

2.2.3 Cálculo de la longitud de la espiral.

Se debe calcular el radio interior (Ri) de la espiral por la siguiente expresión:

$$Ri = Re - n_e * dext \quad (11)$$

Para el cálculo de la longitud de la espira (le) se utiliza la ecuación que se obtiene del análisis de una espiral aritmética, también conocida como espiral de Arquímedes. El esquema de cálculo se muestra en la Fig. 2.1

$$l_e = A - B + C \quad (12)$$

Donde:

$$rii = (Ri^2 + (dext/(2 * \pi))^2)^{0.5};$$

$$ree = (Re^2 + (dext/(2 * \pi))^2)^{0.5};$$

$$A = \pi * Re/dext * ree$$

$$B = \pi * Ri/dext * rii$$

$$C = dext/(4 * \pi) * \ln((Re + ree)/(Ri + rii))$$

2.24 Cálculo de los parámetros cinemáticos y dinámicos de la bomba.

Se calcula la potencia teórica (no se tienen en cuenta las pérdidas por fricción) que demanda la bomba:

Po: potencia necesaria (W)

$$Po = \rho_a * g * H * q_1 \quad (13)$$

Donde:

pa: densidad del agua (kg/m³)

q1: flujo de agua =Q/ (24*3600) (m³/s).

w: frecuencia de giro de la rueda hidráulica (1/s)

$$w = q_1 * K/V_a * \pi/30 \quad (14)$$

vtp: velocidad tangencial de las paletas (m/s)

$$v_{tp} = w * R_e \quad (15)$$

Mt: momento torsor de la rueda (Nm)

$$Mt = P_o/w \quad (16)$$

F: fuerza de la corriente aplicada en las paletas (N)

$$F = M_t/R_e \quad (17)$$

Ap.: Área necesaria de las paletas (m²)

$$Ap = 2 * F / (CD * \rho_a + (vr^2 - vtp^2)) \quad (18)$$

CD: Coeficiente de arrastre para paletas planas =1,96

2.3 Conclusiones parciales.

Las ecuaciones presentadas permiten determinar las principales dimensiones de las bombas de espiral a partir de los datos primarios: Cantidad de agua necesaria en 24 h, altura hidráulica, y velocidad de la corriente que moverá la rueda hidráulica.

No se tienen en cuenta las pérdidas por fricción en los cálculos de los parámetros dinámicos y cinemáticos de la bomba.

Aunque el modelo de cálculo que se presenta no es complejo, no evidencia el comportamiento de los diferentes parámetros para diferentes condiciones de explotación.

Capítulo 3. Análisis de la influencia de los parámetros de diseño de la bomba en sus características de funcionamiento

3.1. Introducción

Para el diseño preliminar de la bomba de espiral, es imprescindible conocer la influencia de los diferentes parámetros de diseño (tabla 3.1) en sus características de funcionamiento, es decir en la cantidad de m^3 que puede bombear en un día y la altura hidráulica a que debe enviar el fluido.

Las condiciones de instalación de la bomba, tal como se explicó en el capítulo 1, están encaminadas al aprovechamiento de la velocidad de una corriente de agua. La profundidad de esta corriente definirá las dimensiones de la rueda hidráulica que acciona la bomba, pues tal como se vio en el capítulo 2 la altura sumergida de dicha rueda debe ser un 40 % del radio exterior de esta. Sin embargo, teniendo en cuenta que la profundidad de la corriente puede ser corregida con obras de ingeniería, para este estudio estimaremos el radio exterior de la rueda hidráulica y a partir de este parámetro se calculará dicha profundidad.

Para determinar esta influencia se realiza un diseño de experimento virtual que simule diferentes escenarios de funcionamiento de la bomba. Una vez definido el tipo de diseño se realizan los cálculos necesarios utilizando el programa escrito en MATLAB R2017a, que se muestra en el anexo 1.

Tabla 3.1 Valores para el estudio.

Variables	Datos 1	Datos 2	Datos 3
Q ($m^3/24$ h)	20	40	80
H (m)	10	20	20
v_r (m/s)	1.0	1.5	2.5
Re (m)	0.75	0.75	1.0

Nota: Elaboración propia

3.2 Experimento virtual

Se escoge un diseño factorial complejo a 3 niveles con 5 factores experimentales tal como se muestra en la tabla 3.2, teniendo como variable respuesta los principales parámetros de diseño de la bomba (tabla 3.3).

Para los cálculos se utiliza el software STATGRAPHICS Centurion XVI. El asistente de diseño de experimentos de este software permite obtener los modelos de regresión de las variables respuesta en función de los factores experimentales definidos. En el anexo 2 pueden verse estos resultados.

Tabla 3.2. Factores experimentales.

Nombre	Unidades	Nivel Bajo	Nivel medio	Nivel alto
A:Flujodiario	m ³ /día	10	45	80
B:altura	M	10	15	20
C:Re	M	0.5	0.75	1
D:dint	M	0.0127	0.019	0.0254
E:vr	m/s	1	2	3

Nota: Elaboración propia

Tabla 3.3 Variable respuesta

Nombre	Unidades
Potencia	W
w	1/min
le	m
ne	vuelatas
Ri	m
Mt	Nm
altura palas	M
Ap	m ²
ancho palas	m

Nota: Elaboración propia

3.3 Análisis de resultados.

La tabla 3.4 muestra la influencia de los diferentes factores experimentales en la potencia generada por la bomba, pudiéndose observar que el modelo explica el 100% de la variabilidad de este parámetro para las condiciones experimentales impuestas, siendo el error estándar de estimación igual a 0.

Tabla 3.4 Efectos estimados para la potencia.

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	76.3795	2.67133E-7	
A:Flujodiario	118.813	6.5434E-7	1.0
B:altura	50.9197	6.5434E-7	1.0
C:Re	0.0	6.5434E-7	1.0
D:dint	0.0	6.5434E-7	1.0
E:vr	0.0	6.5434E-7	1.0
AB	39.6042	8.01399E-7	1.0
AC	0.0	8.01399E-7	1.0
AD	0.0	8.01399E-7	1.0
AE	0.0	8.01399E-7	1.0
BC	0.0	8.01399E-7	1.0
BD	0.0	8.01399E-7	1.0
BE	0.0	8.01399E-7	1.0
CD	0.0	8.01399E-7	1.0
CE	0.0	8.01399E-7	1.0
DE	0.0	8.01399E-7	1.0

Nota: Elaboración propia

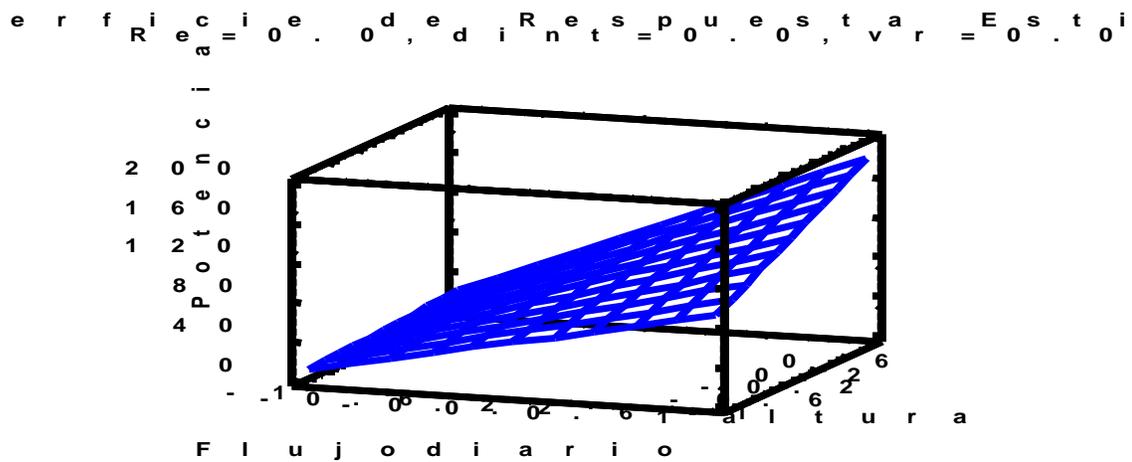
En esta tabla se aprecia que la potencia de la bomba será función directa del flujo y de la altura hidráulica tal como quedó definido en el capítulo 2.

La ecuación de regresión en este caso será:

$$\text{Potencia} = 76.38 + 59.41 * \text{Flujodiario} + 25.46 * \text{Altura} + 19.8 * \text{Flujodiario} * \text{Altura} \quad (1)$$

En la figura 3.1 se observa como la altura hidráulica tiene una mayor influencia en la potencia necesaria de la bomba que el flujo diario que se demande.

Figura 3.1 Superficie de respuesta estimada para la potencia.



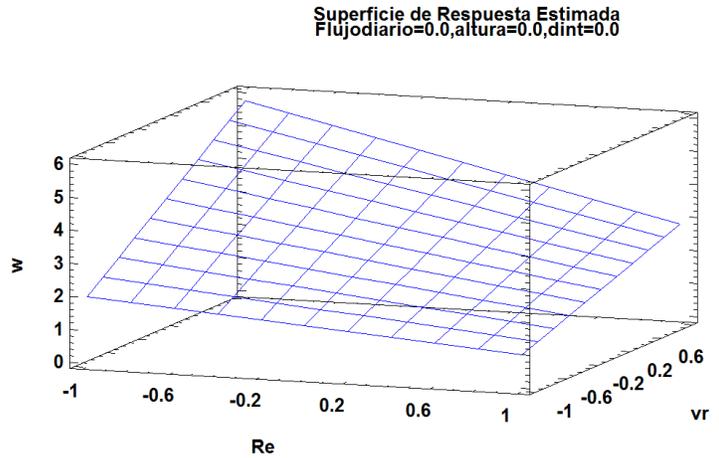
Nota: Elaboración propia

La frecuencia de giro de la rueda hidráulica de acuerdo a la tabla 3.5 será función solo del radio exterior de esta y de la velocidad de la corriente que la mueve. El modelo explica el 98.7% de la variabilidad en la frecuencia de giro con un error estándar de 0.175. En este caso el modelo ajustado tendrá la siguiente forma:

$$W = 2.89 - 1.0 * R_e + 1.44 * V_r - 0.5 * R_e * V_r \quad (2)$$

La figura 3.2 muestra el comportamiento de la frecuencia de giro en el experimento observándose que el mayor valor de este parámetro se obtiene para el radio exterior de la rueda hidráulica mínimo y la máxima velocidad de corriente

Figura 3.2 Superficie de respuesta estimada para la frecuencia de giro.



Nota: Elaboración propia

La longitud del tubo enrollado es un parámetro importante en el diseño de la bomba. En la tabla 3.5 se observa que los factores que influyen en esta longitud son la altura hidráulica y el radio exterior de la rueda, de forma directa y el diámetro interior del tubo de forma inversa. El modelo obtenido explica el 96.96% de la variabilidad de este factor con un error estándar de estimación igual a 2.25 y tiene la siguiente forma:

$$l_e = 43.764 + 11.1005 * altura + 8.31032 * R_e - 3.60266 * d_{int} + 4.8785 * altura * R_e - 1.95737 * altura * dint + 2.12616 * R_e * d_{int} \quad (3)$$

Tabla 3.5 Factores que influyentes

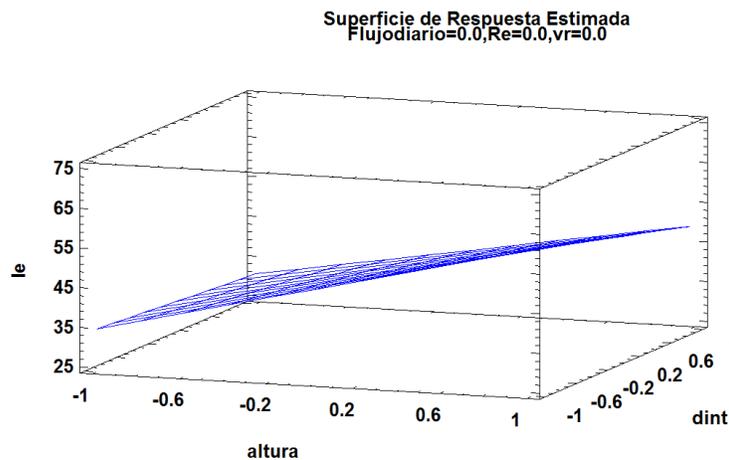
Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	43.764	0.144576	
A:Flujodiario	0.0	0.354136	1.0
B:altura	22.2011	0.354136	1.0
C:Re	16.6206	0.354136	1.0
D:dint	-7.20531	0.354136	1.0
E:vr	0.0	0.354136	1.0
AB	0.0	0.433727	1.0

AC	0.0	0.433727	1.0
AD	0.0	0.433727	1.0
AE	0.0	0.433727	1.0
BC	9.75701	0.433727	1.0
BD	-3.91475	0.433727	1.0
BE	0.0	0.433727	1.0
CD	4.25232	0.433727	1.0
CE	0.0	0.433727	1.0
DE	0.0	0.433727	1.0

Nota: Elaboración propia

En la figura 3.3 se observa que la influencia en la longitud de la tubería enrollada del diámetro interior de esta es inferior a la influencia de altura hidráulica, por lo tanto, la decisión de seleccionar una u otra dimensión para la tubería no es importante en el diseño de la bomba.

Figura 3.3 Superficie de respuesta estimada para la longitud de la tubería de la espiral.



Nota: Elaboración propia

En la tabla 3.6 de los efectos estimados para el número de vueltas de la tubería enrollada se constata que la altura hidráulica y el radio exterior de la rueda influyen en la misma

magnitud, pero en dirección contraria. Es decir, si aumenta la altura hidráulica se necesitará una mayor cantidad de vueltas en el enrollado, una disminución del radio exterior de la rueda hidráulica implicará la necesidad de reducir el número de vueltas. No obstante, la interrelación de los 2 parámetros (altura * Re) influye significativamente en el número de vueltas del enrollado tal como se muestra en la figura 3.4 de la superficie repuesta estimada se necesita una mayor cantidad del número de vueltas en el enrollado cuando la altura hidráulica es la máxima y el radio exterior es el mínimo en los rangos estudios en este experimento.

Tabla 3.6 Efectos estimados

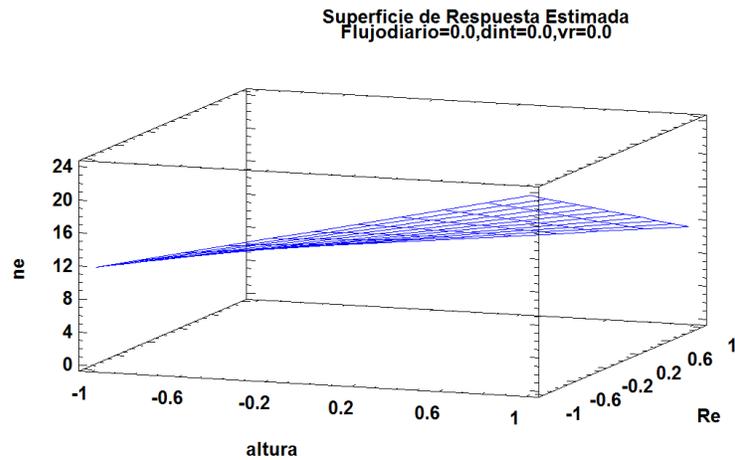
Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	13.0	0.0486395	
A:Flujodiario	0.0	0.119142	1.0
B:altura	8.66667	0.119142	1.0
C:Re	-9.0	0.119142	1.0
D:dint	0.0	0.119142	1.0
E:vr	0.0	0.119142	1.0
AB	0.0	0.145919	1.0
AC	0.0	0.145919	1.0
AD	0.0	0.145919	1.0
AE	0.0	0.145919	1.0
BC	-3.0	0.145919	1.0
BD	0.0	0.145919	1.0
BE	0.0	0.145919	1.0
CD	0.0	0.145919	1.0
CE	0.0	0.145919	1.0
DE	0.0	0.145919	1.0

Nota: Elaboración propia

La ecuación del modelo ajustado, que explica el 98.05% de la variabilidad en Ne con un error estándar de estimación de 0.76, se muestra a continuación:

$$n_e = 13.0 + 4.33333 * altura - 4.5 * R_e - 1.5 * altura * R_e \quad (4)$$

Figura 3.4 Superficie repuesta estimada para Ne (número de espiras).



Nota: Elaboración propia

En el radio exterior de la rueda hidráulica tal como muestra la tabla 3.7 los efectos estimados en este experimento se concentran en los factores altura hidráulica y diámetro interior de la tubería de forma inversa y el radio exterior de forma directa.

Tabla 3. 7 Efectos estimados para Ri.

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	0.47635	0.00110919	
A:Flujodiario	0.0	0.00271696	1.0
B:altura	-0.182433	0.00271696	1.0
C:Re	0.68945	0.00271696	1.0
D:dint	-0.1651	0.00271696	1.0
E:vr	0.0	0.00271696	1.0
AB	0.0	0.00332758	1.0
AC	0.0	0.00332758	1.0
AD	0.0	0.00332758	1.0
AE	0.0	0.00332758	1.0
BC	0.06315	0.00332758	1.0
BD	-0.0550333	0.00332758	1.0
BE	0.0	0.00332758	1.0
CD	0.05715	0.00332758	1.0

CE	0.0	0.00332758	1.0
DE	0.0	0.00332758	1.0

Nota: Elaboración propia

El modelo ajustado explica el 99.7% de la variabilidad en R_i con un error estándar de estimación de 0.017

$$R_i = 0.47635 + 0.0912167 * altura + 0.344725 * R_e - 0.08255 * dint + 0.031575 * altura * R_e - 0.0275167 * altura * dint + 0.028575 * R_e * dint \quad (5)$$

El momento torsor es un parámetro importante para el diseño mecánico de los diferentes elementos de la bomba. En este caso tal como se muestra en la tabla 3.8, excepto el diámetro interior de la tubería todos los demás factores estudiados influyen en su magnitud.

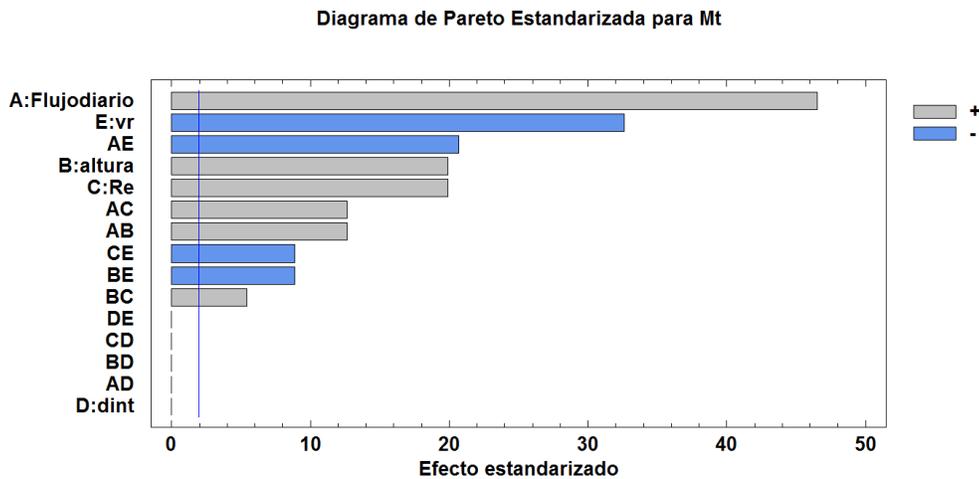
Tabla 3.8 Efectos estimados para M_t

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	35.0073	0.478154	
A:Flujodiario	54.4558	1.17123	1.0
B:altura	23.3382	1.17123	1.0
C:Re	23.3382	1.17123	1.0
D:dint	0.0	1.17123	1.0
E:vr	-38.1898	1.17123	1.0
AB	18.1519	1.43446	1.0
AC	18.1519	1.43446	1.0
AD	0.0	1.43446	1.0
AE	-29.7032	1.43446	1.0
BC	7.7794	1.43446	1.0
BD	0.0	1.43446	1.0
BE	-12.7299	1.43446	1.0
CD	0.0	1.43446	1.0
CE	-12.7299	1.43446	1.0
DE	0.0	1.43446	1.0

Nota: Elaboración propia

En la figura 3.5 se grafica en orden decreciente de importancia la influencia de los factores analizados en el momento torsor, siendo el flujo diario demandado el que más impacta en el incremento de este parámetro; sin embargo, al aumentar la velocidad de la corriente el momento torsor disminuye. Esta información es importante a tener en cuenta en el diseño mecánico de la bomba.

Figura 3.5 Grafica en orden decreciente de importancia de la influencia de los factores analizados, en el momento torsor.



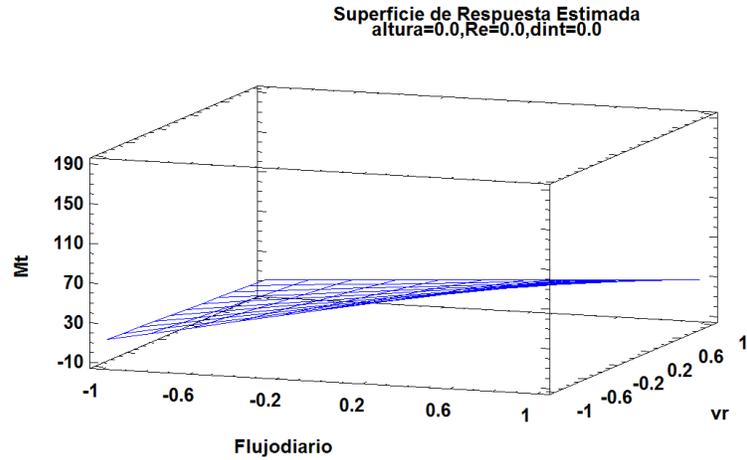
Nota: Elaboración propia

El modelo ajustado explica el 95.6% de las variabilidades en M_t con un error estándar de estimación 7.45 y tiene la siguiente forma:

$$M_t = 35.0073 + 27.2279 * Flujodiario + 11.6691 * altura + 11.6691 * R_e + 19.0949 * v_r + 9.07596 * Flujodiario * altura + 9.07596 * Flujodiario * R_e + 14.8516 * Flujodiario * v_r + 3.8897 * altura * R_e + 6.36496 * altura * v_r + 6.36496 * R_e * v_r \quad (6)$$

La figura 3.6 muestra la superficie de respuesta estimada donde se corrobora que este tiene su menor valor cuando la demanda de flujo diario es mínima y la velocidad de la corriente máxima.

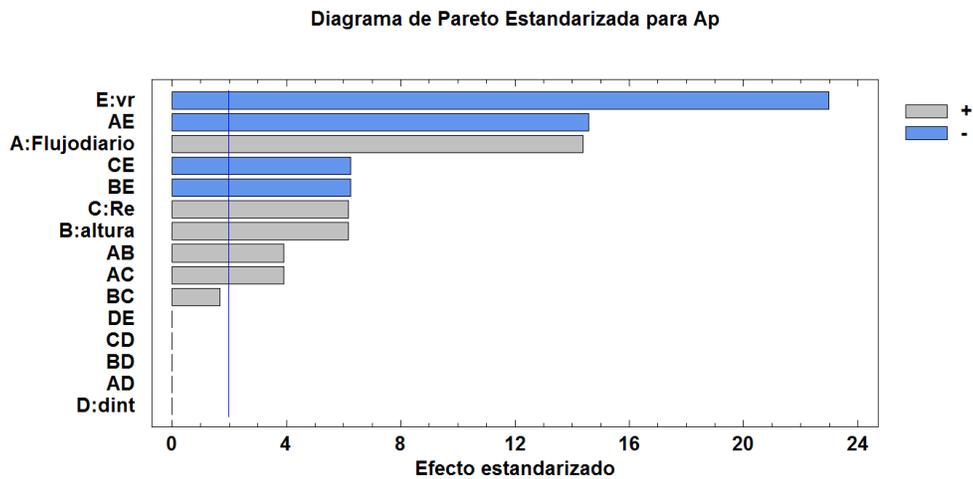
Figura 3.6 Superficie de respuesta estimada para M_t



Nota: Elaboración propia

El área de las palas de la rueda hidráulica tal como muestra la figura 3.7 depende significativamente de 4 de los 5 factores estudiados en este experimento, siendo la velocidad de la corriente la que mayor influye.

Figura 3.6 Diagrama de Pareto estandarizado para el área de las paletas (A_p).



Nota: Elaboración propia

El modelo ajustado describe el 83.3 % de la variabilidad en A_p con un error estándar de 0.025. Hay q destacar en este caso que con vistas a buscar valores límites máximos de fuerza, y de esta forma garantizar coeficientes de seguridad altos, se consideró en este estudio que toda influencia de la corriente se concentraría en una sola pala, lo cual no es exacto pues en dependencia del número de esta existirá una mayor cantidad en contacto con el fluido.

3.3 Conclusiones parciales

1. Las ecuaciones de regresión obtenidas permiten explicar la variabilidad de las dimensiones de las bombas de espiral y sus parámetros dinámicos y cinemáticos, en función de las demandas de flujo y altura necesarias y de la velocidad de la corriente que moverá la rueda hidráulica con errores de estimación bajos.
2. Es posible utilizar los modelos obtenidos para el dimensionamiento de los principales elementos de la bomba y el cálculo de los parámetros cinemáticos y dinámicos de esta.
3. La metodología de análisis utilizada permitirá explorar el funcionamiento de la bomba en otros rangos de valores de los factores de estudio.

Conclusiones Generales

1. Las bombas manométricas en espiral, pueden ser utilizadas en labores de riego agrícola y de suministro de agua en general, en lugares cercanos a corrientes con velocidades bajas, además, son de fácil construcción, bajo costo y se destacan por el bajo impacto ambiental.
2. Los modelos cálculo que se proponen permiten definir las dimensiones de la bomba en dependencia de las demandas de flujo y carga y de las condiciones de la corriente que moverá la rueda, sin tener en cuenta las pérdidas por fricción en los cálculos de los parámetros dinámicos y cinemáticos de la misma.
3. Las ecuaciones de regresión que se obtienen del experimento virtual permiten estudiar el comportamiento de las variables de diseño de la bomba en función de la demanda de flujo de agua diario, la altura hidráulica y la velocidad de la corriente que moverá la rueda.
4. La metodología de análisis utilizada permitirá explorar el funcionamiento de la bomba en otros rangos de valores de los factores de estudio.

Recomendaciones

1. Construir un prototipo de bomba con espiral simple para estudiar el comportamiento del equipo en condiciones de explotación.

Bibliografía

- Annable, R.J. (1982). *Analysis and Development of a Stream-Powered Coil Pump; Loughborough University of Technology*. Loughborough, UK.
- Barsha Pump. (2021) *La bomba hidro-propulsada Barsha pump de la empresa QYSTA para el riego sostenible*.
- Camacho, Gómez O., Torres y Ducón E.L. (2010). *Sistema de bombeo con energía alternativa para la vereda naranjal bajo municipio de socorro*. (Trabajo de Grado). Universidad Industrial de Santander.
- Castro seminario, W.E y Martínez Oviedo, J.Y. (2017). *Construcción de una bomba de espiral para impulsar el agua de riego del canal margen izquierda del rio Tumbes 2017*. (Tesis DE Grado). Universidad Nacional de Tumbes.
- Fraenkel, P.L. (1986). *Water Lifting Devices; FAO Irrigation and Drainage paper*. Rome
- Gutiérrez Camargo, D.E. y Tafur Naquiche J. A. (2019). *Diseño de una bomba tipo espiral para irrigación de cultivos del centro poblado la Cria – Lambayeque*. (Tesis de Grado). Universidad Señor de Sipán.
- Hilton D J. (1986). The inclined coil pump. *Waterlines*, 5(1), pp. 1-12
- Ibrahim, G.A. Che haron, C.H. Azhari, C.H. (2010). *Traditional Water Wheels as a Renewable Rural Energy*. Online J. Power Energy Eng.
- Intriago Zambrano, J.C; Michavila, J.; Arenas Pinilla, E.; Diehl (2019). *Water Lifting Water: A Comprehensive Spatiotemporal*.
- Jacobs, P. (2008). *Spiral Pump Using Water Current of Shire River at Zalewa, Malawi; Uniterra*. Blantyre.
- Kassab, S.Z.; Abdel Naby, A.A.; Abdel Basier, E.S.I. (2006) *Performance of Multi-Layers Coil Pump. In Proceedings of the Tenth International Water Technology Conference, IWTC10 2006*. Alexandria.
- Kyriakopoulos, G. (2015). *Water Pumping Mechanisms in Ancient World*. (Master's Thesis) National Technological University of Athens.
- Pellicer Orte, JJ. (2014). *Construcción, caracterización y estudio aplicación de una bomba de riego de una finca agrícola*. Escuela Politécnica Superior de Huesca.
- Quiroga, J.; Tschiersch, K. and Bohórquez. O. (2019). Coil pump design as an object of meaningful learning. *IOP Journal of Physics*,

- Quaranta, E. and Michavila, J. (2018) *Sustainable Irrigation with Hydro-Powered Pumps*. Hydrolink.
- Ramli, M.I., Basar, M.F., Razik, N.H.A. (2013). Natural Energy Water Pump: Revisit the Water Sling Pump. (*International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*), 3(2), pp. 1-2
- Sanmartin, A.P. (2022). *Diseño y construcción de un prototipo de bomba Barsha*. Director: Miguel a. Carballo. (Trabajo de grado). Universidad de Loja.
- Sanmiguel, J.C. y Machuca., A. (2012). *Rediseño del Sistema de Bombeo con Energía No-Convencional (Bomba de Rueda)*. (Trabajo de Grado). Universidad Industrial de Santander.
- Stuckey, A.T.and Wilson, E.M. (1981) *The stream-powered manometric pump*. *Approp. Technol. Civ. Eng.*
- Tassios, T. (2015). *A Potential Steam-Powered Force Pump in Hellenistic Times (ca. 330–67 BC)*; Newsletter of IWA SG on Water & Wastewater in Ancient Civilizations (WWAC); International
- Thompson, P.L; Milonova, S.; Reha, M.; Mased, F. and Tromble, I. (2011). Coil Pump Design for a Community Fountain in Zambia. (*International Journal for Service Learning in Engineering*), 6(1)
- Yannopoulos, S.I; Lyberatos, G; Theodossiou, N; Li, W; Valipour, M; Tamburrino, A. and Angelakis, A.N. (2015). Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries (*Worldwide. Water*), (7), pp. 5031-5060
- Young, T. (2007). *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. Joseph Johnson.

Anexo I: Software Matlab para el dimensionado de la bomba manométrica en espiral.

Programa Matlab

```
clc; clear;

AA = [Diseño Experimento 3^5=243 corridas];

Limites = [10    45    80
           10    15    20
           0.5   0.75   1
           0.0127 0.01905 0.0254
           1     2     3]; %Flujodiario, H, Re,rint,vr

i=1;
while i<6
    for j=1:243
        if AA(j,i)==-1
            BA(j,i)=Limites(i,1);
        end
        if AA (j, i) ==0
            BA (j, i) =Limites(i,2);
        end
        if AA (j, i) ==1
            BA (j, i) =Limites(i,3);
        end
    end
    i=i+1;
end

% Constantes
```

```

peh2o=997; %Densidad del agua kg/m3
g=9.806; %aceleración de la gravedad m/s2
pa=101325; % presión atmosférica
espesor=0.002; %espesor del tubo
prsm=0; %por ciento rueda sin manguera enrollada
cp=8; %cantidad de paletas

for j=1:243
% Datos
Q=BA(j,1); %Caudal de diseño m3 en 24 h
H=BA(j,2); %Altura de descarga agua m
vr=BA(j,5); %velocidad de la corriente de agua m/s

% Parámetros de diseño
Re=BA(j,3); %radio exterior de los espirales m
dint=BA(j,4); % diámetro interior del tubo de los espirales m

dext=dint+espesor; % diámetro exterior del tubo

% Cálculos

hs=0.4*Re; % altura sumergida m
hsno=Re-hs; %altura no sumergida m
Rimang=dint/2; % radio interior de la manguera m
Rp=Re-Rimang; %radio primitivo m
AC=(Rp^2-hsno^2) ^0.5;
alfa=atan(AC/hsno);
alfgrado=alfa*180/pi;

s1=Rp*alfa*2; %longitud arco sumergido m

```

```

s2=Rp*(360-2*alfgrado) *pi/180; %arco lleno de aire m
st=s1+s2;

K=H/(s2-s1);

hn=(pa+2*Re) *2*Re/(pa+H);
ne=round(1.2*2*H/(2*Re+hn)); %número de espiras
BA(j,9) =ne;
Ri=Re-ne*dext/(1-prsm); % Radio interior rueda
BA(j,10) =Ri;
%longitud lineal de la espiral m
rii=(Ri^2+(dext/(2*pi))^2)^0.5;
ree=(Re^2+(dext/(2*pi))^2)^0.5;
le=pi*Re/dext*ree-pi*Ri/dext*rii+dext/(4*pi) *log((Re+ree)/(Ri+rii));
BA(j,8) =le;
%lee=pi*(4*Re^2-4*Ri^2) /(4*dext)

Lth2o=K*s1; %longitud que ocupa h2o en espiral m
Ltaire=K*s2; %aire

% volumen de agua en espiral m3
Vh2o=pi*Rimang^2*Lth2o;

q1=Q/(24*3600); % Flujo de salida m3/s
Po=peh2o*g*H*q1; % Potencia W
BA(j,6) =Po;
n=q1*K/Vh2o; % rpm
w=n*pi/30; % velocidad angular de la rueda 1/s
Vh2osale=pi*Rimang^2*s1*w*36000*24; %m3/día =Q

Mt=Po/w; % momento torsor Nm

```

```

F1=Mt/Re; % Fuerza en paleta

%Ap=F1*2/(1.98*peh2o+(vr^2-vtp^2))

%ancho=Ap/(rang*hs)
%presión de descarga de la bomba
Ph=peh2o*g*K*(s2-s1);

vrr=w*(hsno+hs/2);
if vrr<vr
    vrr=vr;
    w=vrr/Re;
    Mt=Po/w;
end

BA(j,11) =Mt;
BA(j,7) =w;
fp=Mt*Re/(hsno+hs/2);
Ap=2*fp/(1.5*vrr^2*peh2o);
BA(j,13) =Ap;
b=Ap/hs;
BA(j,12) =hs;
BA(j,14) =b;

end

```

Anexo II. Resultados estadísticos del análisis del diseño de experimento virtual.

Asistente de Diseño de Experimentos

Paso 1: Definir las variables respuesta a ser medidas

Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo	Destino	Impacto	Sensibilidad	Bajo	Alto
Potencia	W	Media	Maximizar		3.0	Medio		
W	1/min	Media	Maximizar		3.0	Medio		
Le	m	Media	Maximizar		3.0	Medio		
Ne	vuelatas	Media	Maximizar		3.0	Medio		
Ri	m	Media	Maximizar		3.0	Medio		
Mt	Nm	Media	Maximizar		3.0	Medio		
altura palas	m	Media	Maximizar		3.0	Medio		
Ap	m ²	Media	Maximizar		3.0	Medio		
ancho palas	m	Media	Maximizar		3.0	Medio		

Paso 2: Definir los factores experimentales que van a variar

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Bajo	Alto	Niveles
A:Flujodiario	m ³ /día	Continuo	Controlable	-1.0	1.0	
B:altura	M	Continuo	Controlable	-1.0	1.0	
C:Re	M	Continuo	Controlable	-1.0	1.0	
D:dint	M	Continuo	Controlable	-1.0	1.0	
E:vr	m/s	Continuo	Controlable	-1.0	1.0	

Paso 3: Seleccione el diseño experimental

Tipo of	Diseño	Puntos Centrales	Punto Central	Diseño es	Número de	Total
Factores	Tipo	Por Bloque	Colocación	Aleatorizado	Replicaciones	Ejecuciones
Proceso	Factorial multinivel	2	Aleatorio	Sí	0	243

Total	Error
Bloques	D.F.
1	222

Número de muestras por ejecución: 1

Paso 4: Indicar el modelo inicial a ajustar a los resultados del experimento

<i>Factores</i>	<i>Modelo</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Efectos excluidos</i>
Proceso	Cuadrático	16	

Paso 5: Seleccionar un subconjunto óptimo de ejecuciones (opcional)

243 ejecuciones seleccionadas

Paso 6: Seleccionar tablas y gráficos para evaluar las ejecuciones seleccionadas

Para mostrar diagnósticos de diseño, utilice la casilla de verificación en el cuadro de diálogo Opciones de Análisis.

Paso 7: Guardar el experimento

Archivo de diseño: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Paso 8: Analizar los resultados del experimento

<i>Modelo</i>	<i>Potencia</i>	<i>w</i>	<i>le</i>	<i>ne</i>	<i>Ri</i>	<i>Mt</i>	<i>altura palas</i>
Transformación	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno	ninguno
Modelo d.f.	15	15	15	15	15	15	15
P-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Error d.f.	227	227	227	227	227	227	227
Stand. error	0.00000416419	0.175605	2.25371	0.758215	0.0172906	7.45369	0.0
R-cuadrado	100.00	98.69	96.96	98.05	99.69	95.62	100.00
Adj. R-cuadrado	100.00	98.60	96.75	97.92	99.67	95.33	100.00

<i>Ap</i>	<i>anchopalas</i>
ninguno	ninguno
15	15
0.0000	0.0000
227	227
0.0255436	0.0784924
83.33	84.35
82.23	83.32

Paso 9: Optimizar las respuestas

Ejecutar este paso para determinar las condiciones operativas del óptimo.

Paso 10: Guardar los resultados

StatFolio actual: E:\bomba\bomba.sgp

Paso 11: Aumentar diseño

Ejecutar este paso para añadir ejecuciones adicionales al diseño.

Paso 12: Extrapolar el modelo

Ejecutar este paso para encontrar las mejores condiciones de operación.

El StatAdvisor

Ha especificado 9 variables respuesta y 5 factores experimentales. El diseño seleccionado tiene 243 ejecuciones, con 1 una muestra para ser tomada en cada ejecución. El modelo por defecto es cuadrático con 16 coeficientes.

Los modelos estadísticos han sido ajustados a las variables de respuesta. Modelos con P-valores por debajo de 0.05, de los cuales hay 8, indican que el modelo ajustado es estadísticamente significativo al 5.0% de nivel de significación. También es interesante el estadístico R-cuadrado, el cual muestra el porcentaje de variación en la respuesta que ha sido explicado por el modelo ajustado. El rango de valores de R-cuadrado varía de 83.33% a 100.00%.

Analizar Experimento - Potencia

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para Potencia (W)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	76.3795	2.67133E-7	
A:Flujodiario	118.813	6.5434E-7	1.0
B:altura	50.9197	6.5434E-7	1.0
C:Re	0.0	6.5434E-7	1.0
D:dint	0.0	6.5434E-7	1.0
E:vr	0.0	6.5434E-7	1.0
AB	39.6042	8.01399E-7	1.0

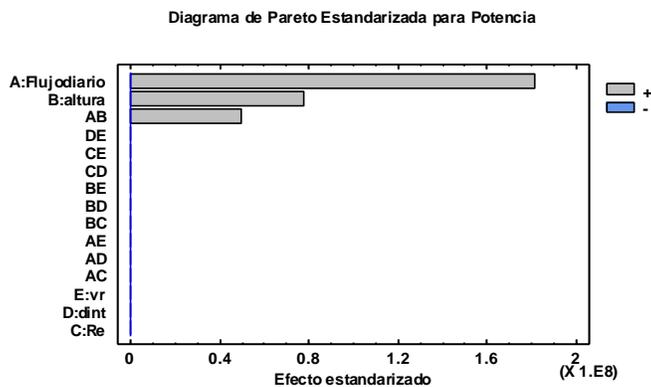
AC	0.0	8.01399E-7	1.0
AD	0.0	8.01399E-7	1.0
AE	0.0	8.01399E-7	1.0
BC	0.0	8.01399E-7	1.0
BD	0.0	8.01399E-7	1.0
BE	0.0	8.01399E-7	1.0
CD	0.0	8.01399E-7	1.0
CE	0.0	8.01399E-7	1.0
DE	0.0	8.01399E-7	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Análisis de Varianza para Potencia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujodiario	571716.	1	571716.	*****	0.0000
B:altura	105009.	1	105009.	*****	0.0000

C:Re	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
D:dint	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
E:vr	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AB	42349.3	1	42349.3	*****	0.0000
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
DE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
Error total	3.93629E-9	227	1.73405E-11		
Total (corr.)	719074.	242			

R-cuadrada = 100.0 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 100.0 porciento

Error estándar del est. = 0.00000416419

Error absoluto medio = 0.0

Estadístico Durbin-Watson =

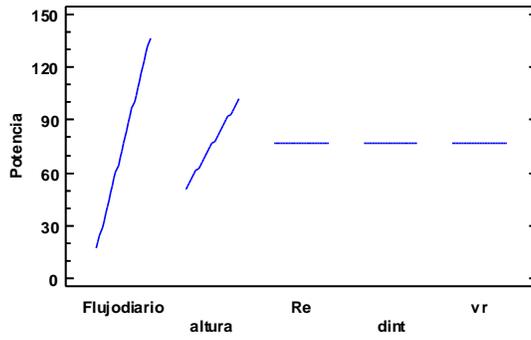
Autocorrelación residual de Lag 1 =

El StatAdvisor

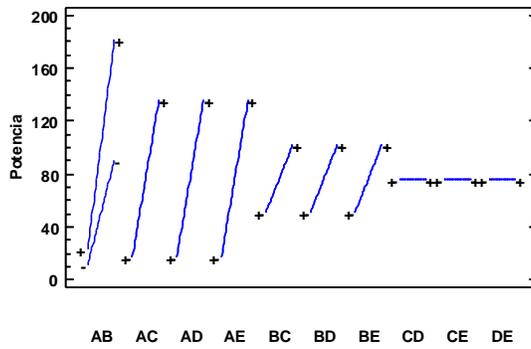
La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Potencia en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100.0% de la variabilidad en Potencia. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 100.0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.00000416419. El error medio absoluto (MAE) de 0.0 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

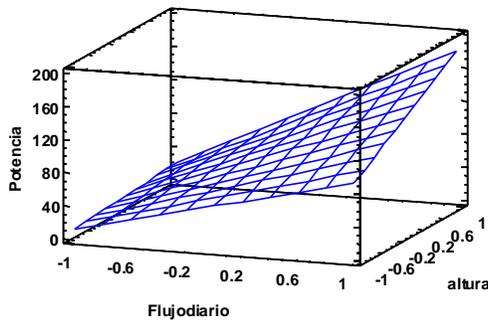
Gráfica de Efectos Principales para Potencia



Gráfica de Interacción para Potencia



Superficie de Respuesta Estimada
Re=0.0,dint=0.0,vr=0.0



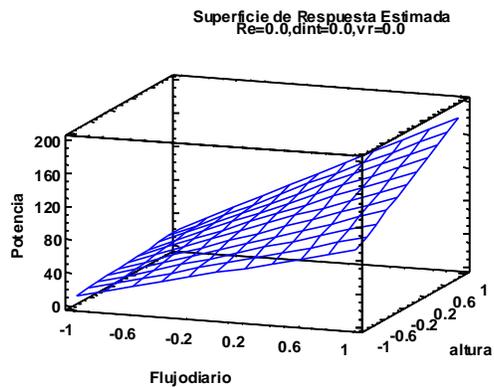
Camino de Máximo Ascenso para Potencia

					Predicción para
Flujodiario	Altura	Re	dint	vr	Potencia
(m ³ /dia)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(W)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76.3795
1.0	0.544644	0.0	0.0	0.0	160.438

2.0	1.25806	0.0	0.0	0.0	277.047
3.0	2.06943	0.0	0.0	0.0	430.223
4.0	2.9387	0.0	0.0	0.0	621.593
5.0	3.84381	0.0	0.0	0.0	851.852

El StatAdvisor

Esta ventana despliega el trayecto de máximo ascenso (o descenso). Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar o decrementar Potencia. Actualmente, 6 puntos se han generado cambiando Flujodiario en incrementos de 1.0 m3/día. Puede especificarse la cantidad de cambio en cualquiera de los factores presionando el botón secundario del ratón y seleccionando Opciones de Ventana. STATGRAPHICS determinará entonces cuanto tendrán que cambiar los otros factores para mantenerse en el trayecto del máximo ascenso. El programa también calcula la Potencia estimada en cada uno de los puntos del trayecto, con los cuales pueden compararse los resultados si es que se corren esos ensayos.



[Analizar Experimento - w](#)

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para w (1/min)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	2.88889	0.011265	
A:Flujodiario	0.0	0.0275936	1.0
B:altura	0.0	0.0275936	1.0

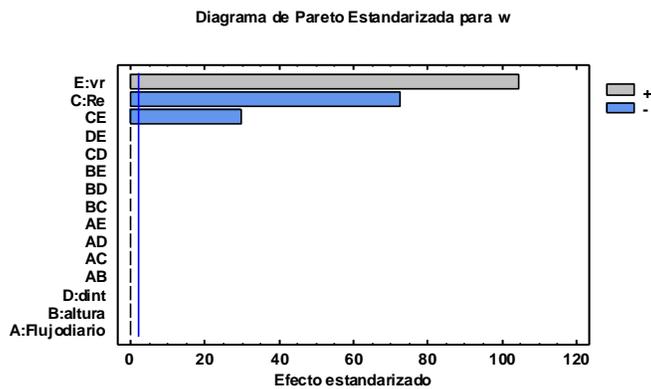
C:Re	-2.0	0.0275936	1.0
D:dint	0.0	0.0275936	1.0
E:vr	2.88889	0.0275936	1.0
AB	0.0	0.0337951	1.0
AC	0.0	0.0337951	1.0
AD	0.0	0.0337951	1.0
AE	0.0	0.0337951	1.0
BC	0.0	0.0337951	1.0
BD	0.0	0.0337951	1.0
BE	0.0	0.0337951	1.0
CD	0.0	0.0337951	1.0
CE	-1.0	0.0337951	1.0
DE	0.0	0.0337951	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Análisis de Varianza para w

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujodiario	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
B:altura	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
C:Re	162.0	1	162.0	5253.43	0.0000
D:dint	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
E:vr	338.0	1	338.0	10960.86	0.0000
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CE	27.0	1	27.0	875.57	0.0000
DE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
Error total	7.0	227	0.030837		
Total (corr.)	534.0	242			

R-cuadrada = 98.6891 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98.6025 por ciento

Error estándar del est. = 0.175605

Error absoluto medio = 0.148148

Estadístico Durbin-Watson = 2.15608 (P=0.8878)

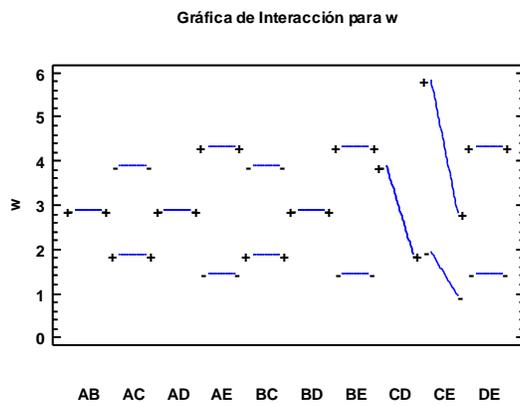
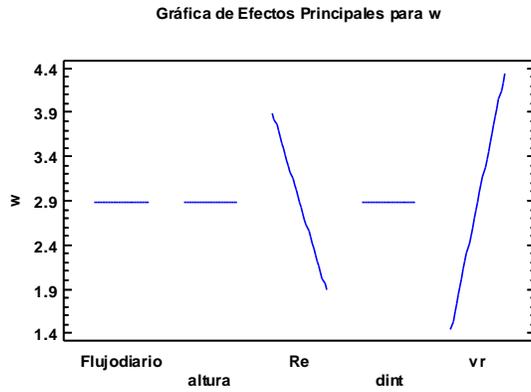
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0784832

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de w en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98.6891% de la variabilidad en w. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98.6025%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.175605. El error medio absoluto (MAE) de 0.148148 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos

para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.



Matriz de Correlación para los Efectos

Estimados

[Analizar Experimento - le](#)

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para le (m)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	43.764	0.144576	
A:Flujodiario	0.0	0.354136	1.0
B:altura	22.2011	0.354136	1.0
C:Re	16.6206	0.354136	1.0

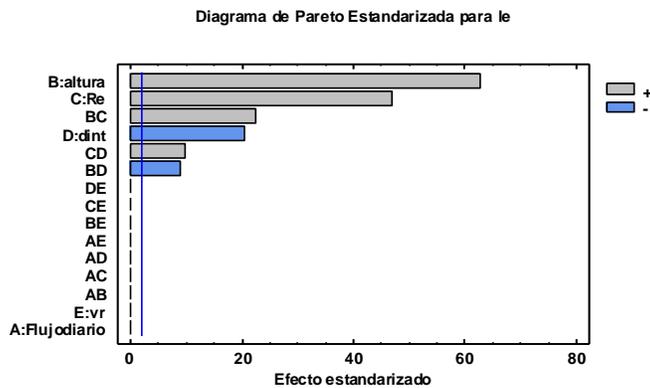
D:dint	-7.20531	0.354136	1.0
E:vr	0.0	0.354136	1.0
AB	0.0	0.433727	1.0
AC	0.0	0.433727	1.0
AD	0.0	0.433727	1.0
AE	0.0	0.433727	1.0
BC	9.75701	0.433727	1.0
BD	-3.91475	0.433727	1.0
BE	0.0	0.433727	1.0
CD	4.25232	0.433727	1.0
CE	0.0	0.433727	1.0
DE	0.0	0.433727	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Análisis de Varianza para le

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujodiario	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
B:altura	19962.0	1	19962.0	3930.14	0.0000
C:Re	11188.0	1	11188.0	2202.70	0.0000
D:dint	2102.62	1	2102.62	413.97	0.0000
E:vr	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AB	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AC	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BC	2570.38	1	2570.38	506.06	0.0000
BD	413.782	1	413.782	81.47	0.0000
BE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CD	488.22	1	488.22	96.12	0.0000
CE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
DE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
Error total	1152.98	227	5.07921		
Total (corr.)	37877.9	242			

R-cuadrada = 96.9561 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.7549 por ciento

Error estándar del est. = 2.25371

Error absoluto medio = 1.76607

Estadístico Durbin-Watson = 1.98454 (P=0.4522)

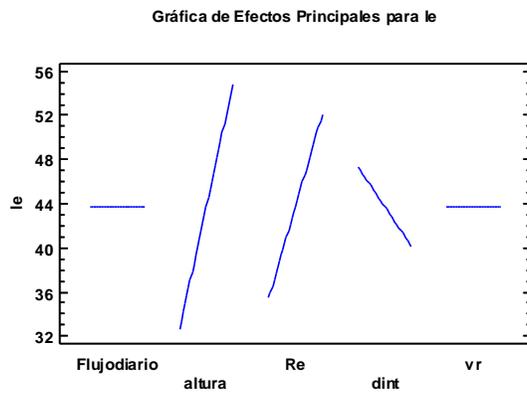
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.00553736

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de le en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 6 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.9561% de la variabilidad en le. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96.7549%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 2.25371. El error medio absoluto (MAE) de 1.76607 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos

para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.



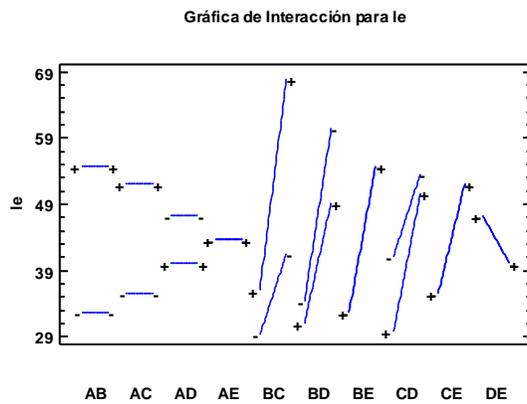
Coef. de regresión para le

Coeficiente	Estimado
constante	43.764
A:Flujodiario	0.0
B:altura	11.1005
C:Re	8.31032
D:dint	-3.60266
E:vr	0.0
AB	0.0
AC	0.0
AD	0.0
AE	0.0
BC	4.8785
BD	-1.95737
BE	0.0
CD	2.12616
CE	0.0
DE	0.0

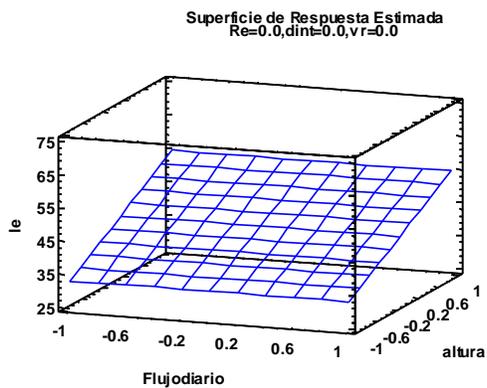
Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$le = 43.764 + 0.0*Flujodiario + 11.1005*altura + 8.31032*Re - 3.60266*dint + 0.0*vr + 0.0*Flujodiario*altura + 0.0*Flujodiario*Re + 0.0*Flujodiario*dint + 0.0*Flujodiario*vr + 4.8785*altura*Re - 1.95737*altura*dint + 0.0*altura*vr + 2.12616*Re*dint + 0.0*Re*vr + 0.0*dint*vr$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.



E



Analizar Experimento - ne

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para ne (vueltas)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	13.0	0.0486395	
A:Flujodiario	0.0	0.119142	1.0
B:altura	8.66667	0.119142	1.0
C:Re	-9.0	0.119142	1.0
D:dint	0.0	0.119142	1.0
E:vr	0.0	0.119142	1.0
AB	0.0	0.145919	1.0
AC	0.0	0.145919	1.0
AD	0.0	0.145919	1.0
AE	0.0	0.145919	1.0
BC	-3.0	0.145919	1.0
BD	0.0	0.145919	1.0
BE	0.0	0.145919	1.0
CD	0.0	0.145919	1.0
CE	0.0	0.145919	1.0
DE	0.0	0.145919	1.0

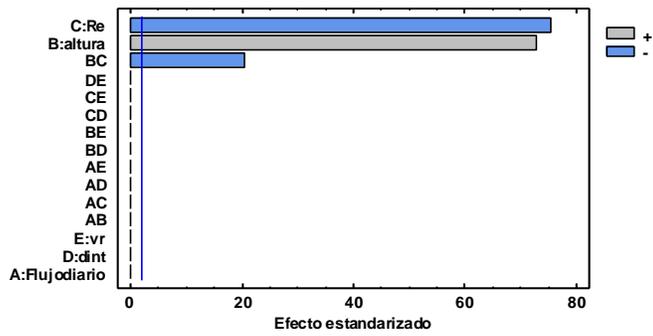
Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

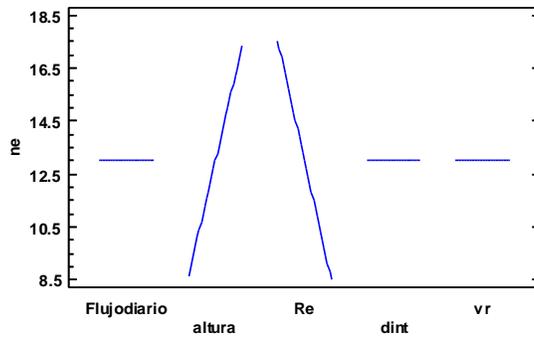
Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.

Diagrama de Pareto Estandarizada para ne



Gráfica de Efectos Principales para ne



Coef. de regresión para ne

Coeficiente	Estimado
constante	13.0
A:Flujodiario	0.0
B:altura	4.33333
C:Re	-4.5
D:dint	0.0
E:vr	0.0
AB	0.0
AC	0.0
AD	0.0
AE	0.0
BC	-1.5
BD	0.0
BE	0.0

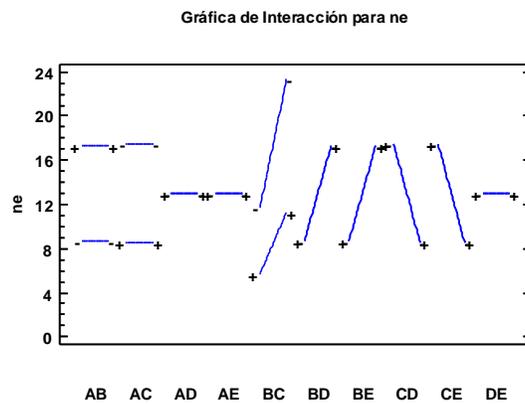
CD	0.0
CE	0.0
DE	0.0

El StatAdvisor

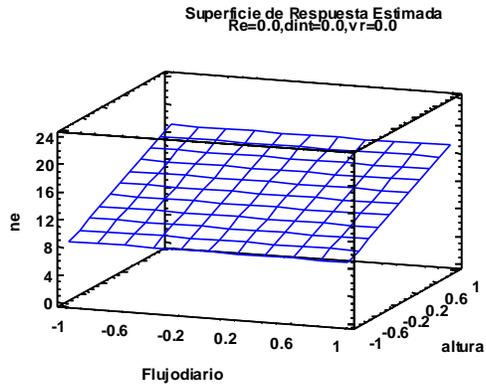
Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$ne = 13.0 + 0.0*Flujodiario + 4.33333*altura - 4.5*Re + 0.0*dint + 0.0*vr + 0.0*Flujodiario*altura + 0.0*Flujodiario*Re + 0.0*Flujodiario*dint + 0.0*Flujodiario*vr - 1.5*altura*Re + 0.0*altura*dint + 0.0*altura*vr + 0.0*Re*dint + 0.0*Re*vr + 0.0*dint*vr$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.



Matriz de Correlación para los Efectos Estimados



Analizar Experimento - Ri

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para Ri (m)

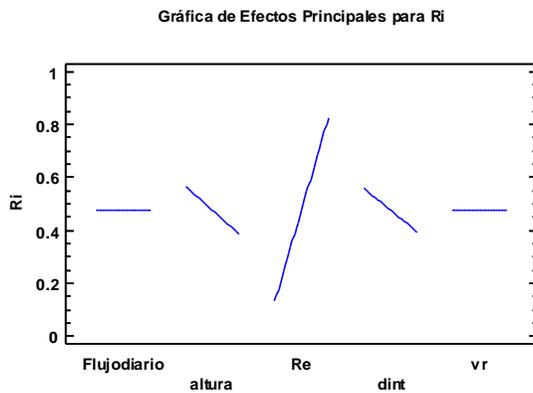
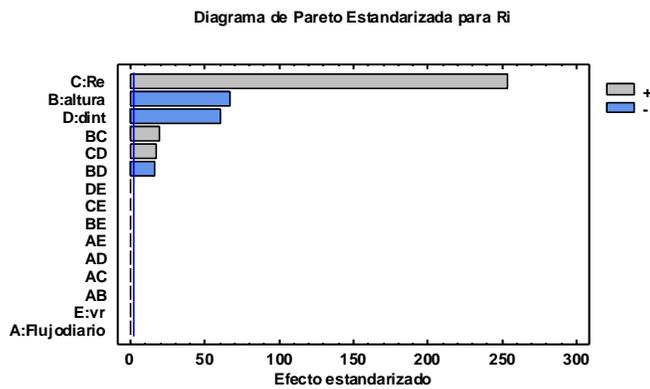
<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	0.47635	0.00110919	
A:Flujodiario	0.0	0.00271696	1.0
B:altura	-0.182433	0.00271696	1.0
C:Re	0.68945	0.00271696	1.0
D:dint	-0.1651	0.00271696	1.0
E:vr	0.0	0.00271696	1.0
AB	0.0	0.00332758	1.0
AC	0.0	0.00332758	1.0
AD	0.0	0.00332758	1.0
AE	0.0	0.00332758	1.0
BC	0.06315	0.00332758	1.0
BD	-0.0550333	0.00332758	1.0
BE	0.0	0.00332758	1.0
CD	0.05715	0.00332758	1.0
CE	0.0	0.00332758	1.0
DE	0.0	0.00332758	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Coef. de regresión para Ri

Coeficiente	Estimado
constante	0.47635
A:Flujodiario	0.0

B:altura	-0.0912167
C:Re	0.344725
D:dint	-0.08255
E:vr	0.0
AB	0.0
AC	0.0
AD	0.0
AE	0.0
BC	0.031575
BD	-0.0275167
BE	0.0
CD	0.028575
CE	0.0
DE	0.0

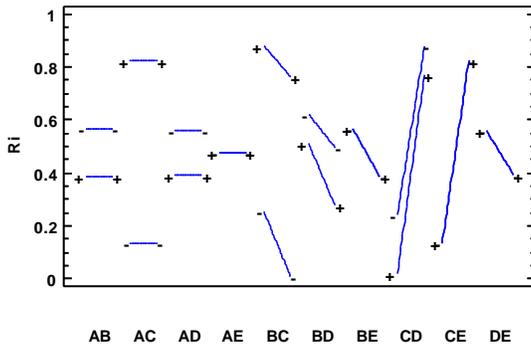
El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$R_i = 0.47635 + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} - 0.0912167 \cdot \text{altura} + 0.344725 \cdot \text{Re} - 0.08255 \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{altura} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{Re} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{vr} + 0.031575 \cdot \text{altura} \cdot \text{Re} - 0.0275167 \cdot \text{altura} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{altura} \cdot \text{vr} + 0.028575 \cdot \text{Re} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{Re} \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{dint} \cdot \text{vr}$$

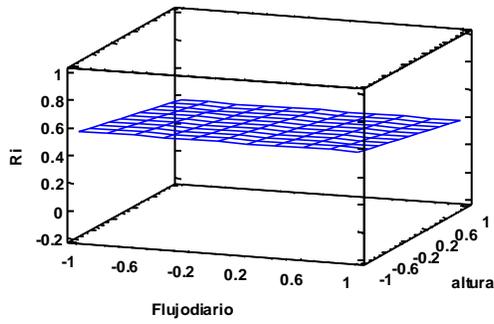
en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

Gráfica de Interacción para Ri



Resultados Estimados para Ri

Superficie de Respuesta Estimada
Re=0.0,dint=0.0,vr=0.0



Analizar Experimento - Mt

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para Mt (Nm)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	35.0073	0.478154	
A:Flujodiario	54.4558	1.17123	1.0
B:altura	23.3382	1.17123	1.0
C:Re	23.3382	1.17123	1.0
D:dint	0.0	1.17123	1.0

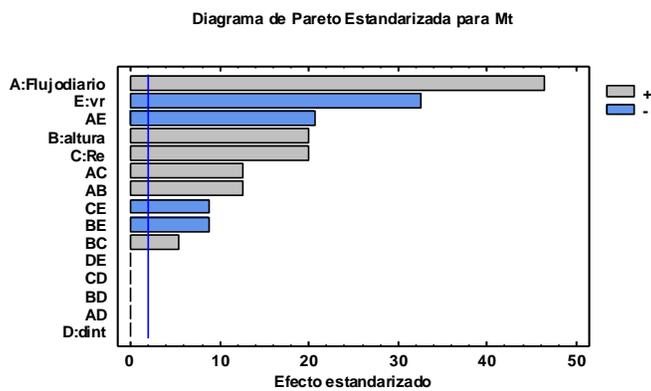
E:vr	-38.1898	1.17123	1.0
AB	18.1519	1.43446	1.0
AC	18.1519	1.43446	1.0
AD	0.0	1.43446	1.0
AE	-29.7032	1.43446	1.0
BC	7.7794	1.43446	1.0
BD	0.0	1.43446	1.0
BE	-12.7299	1.43446	1.0
CD	0.0	1.43446	1.0
CE	-12.7299	1.43446	1.0
DE	0.0	1.43446	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianzas (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Análisis de Varianza para Mt

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
--------	-------------------	----	----------------	---------	---------

A:Flujodiario	120100.	1	120100.	2161.73	0.0000
B:altura	22059.2	1	22059.2	397.05	0.0000
C:Re	22059.2	1	22059.2	397.05	0.0000
D:dint	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
E:vr	59067.6	1	59067.6	1063.18	0.0000
AB	8896.3	1	8896.3	160.13	0.0000
AC	8896.3	1	8896.3	160.13	0.0000
AD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AE	23821.5	1	23821.5	428.77	0.0000
BC	1634.01	1	1634.01	29.41	0.0000
BD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BE	4375.38	1	4375.38	78.75	0.0000
CD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CE	4375.38	1	4375.38	78.75	0.0000
DE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
Error total	12611.6	227	55.5575		
Total (corr.)	287896.	242			

R-cuadrada = 95.6194 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.3299 por ciento

Error estándar del est. = 7.45369

Error absoluto medio = 5.54133

Estadístico Durbin-Watson = 1.94471 (P=0.3337)

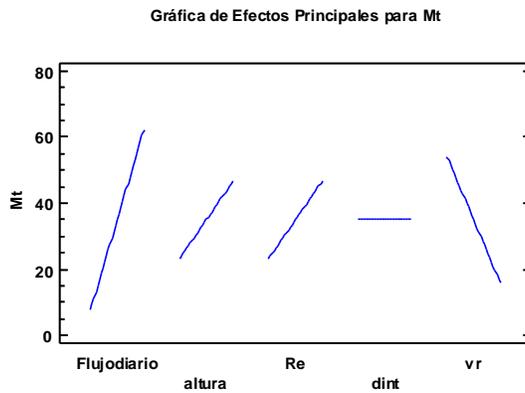
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.0226528

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Mt en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 10 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95.6194% de la variabilidad en Mt. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.3299%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 7.45369. El error medio absoluto (MAE) de 5.54133 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto

que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.



Coef. de regresión para Mt

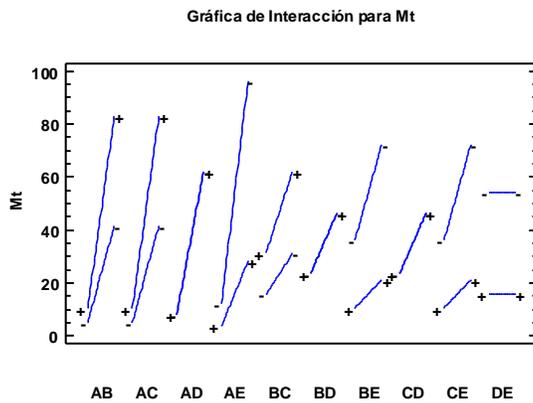
Coeficiente	Estimado
constante	35.0073
A:Flujodiario	27.2279
B:altura	11.6691
C:Re	11.6691
D:dint	0.0
E:vr	-19.0949
AB	9.07596
AC	9.07596
AD	0.0
AE	-14.8516
BC	3.8897
BD	0.0
BE	-6.36496
CD	0.0
CE	-6.36496
DE	0.0

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$Mt = 35.0073 + 27.2279*Flujodiario + 11.6691*altura + 11.6691*Re + 0.0*dint - 19.0949*vr + 9.07596*Flujodiario*altura + 9.07596*Flujodiario*Re + 0.0*Flujodiario*dint - 14.8516*Flujodiario*vr + 3.8897*altura*Re + 0.0*altura*dint - 6.36496*altura*vr + 0.0*Re*dint - 6.36496*Re*vr + 0.0*dint*vr$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.



Análisis de Varianza para alturapalas

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujodiario	0.0	1	0.0		
B:altura	0.0	1	0.0		
C:Re	1.62	1	1.62		
D:dint	0.0	1	0.0		
E:vr	0.0	1	0.0		
AB	0.0	1	0.0		
AC	0.0	1	0.0		
AD	0.0	1	0.0		
AE	0.0	1	0.0		

BC	0.0	1	0.0		
BD	0.0	1	0.0		
BE	0.0	1	0.0		
CD	0.0	1	0.0		
CE	0.0	1	0.0		
DE	0.0	1	0.0		
Error total	0.0	227	0.0		
Total (corr.)	1.62	242			

R-cuadrada = 100.0 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 100.0 porciento

Error estándar del est. = 0.0

Error absoluto medio = 0.0

Estadístico Durbin-Watson =

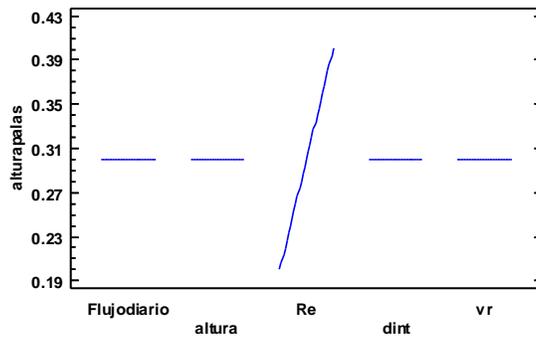
Autocorrelación residual de Lag 1 =

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de alturapalas en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100.0% de la variabilidad en alturapalas. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 100.0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0. El error medio absoluto (MAE) de 0.0 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo.

Gráfica de Efectos Principales para alturapalas



Coef. de regresión para alturapalas

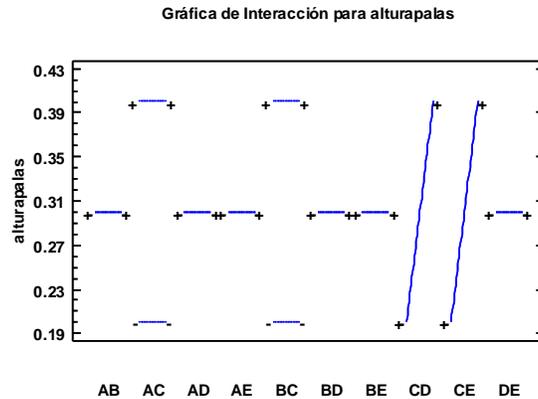
Coeficiente	Estimado
constante	0.3
A:Flujodiario	0.0
B:altura	0.0
C:Re	0.1
D:dint	0.0
E:vr	0.0
AB	0.0
AC	0.0
AD	0.0
AE	0.0
BC	0.0
BD	0.0
BE	0.0
CD	0.0
CE	0.0
DE	0.0

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{alturapalas} = 0.3 + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} + 0.0 \cdot \text{altura} + 0.1 \cdot \text{Re} + 0.0 \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{altura} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{Re} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{Flujodiario} \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{altura} \cdot \text{Re} + 0.0 \cdot \text{altura} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{altura} \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{Re} \cdot \text{dint} + 0.0 \cdot \text{Re} \cdot \text{vr} + 0.0 \cdot \text{dint} \cdot \text{vr}$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.



Analizar Experimento - Ap

Nombre del archivo: E:\bomba\experimento bomba barsha.sgx

Efectos estimados para Ap (m2)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	0.0370929	0.00163862	
A:Flujodiario	0.0577	0.00401379	1.0
B:altura	0.0247286	0.00401379	1.0
C:Re	0.0247286	0.00401379	1.0
D:dint	0.0	0.00401379	1.0
E:vr	-0.092215	0.00401379	1.0
AB	0.0192333	0.00491587	1.0
AC	0.0192333	0.00491587	1.0
AD	0.0	0.00491587	1.0
AE	-0.0717228	0.00491587	1.0
BC	0.00824286	0.00491587	1.0

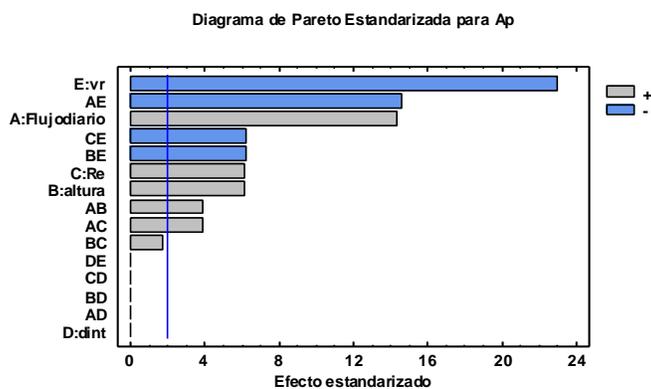
BD	0.0	0.00491587	1.0
BE	-0.0307383	0.00491587	1.0
CD	0.0	0.00491587	1.0
CE	-0.0307383	0.00491587	1.0
DE	0.0	0.00491587	1.0

Errores estándar basados en el error total con 227 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



Análisis de Varianza para Ap

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Flujodiario	0.134836	1	0.134836	206.65	0.0000
B:altura	0.0247659	1	0.0247659	37.96	0.0000
C:Re	0.0247659	1	0.0247659	37.96	0.0000
D:dint	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
E:vr	0.344396	1	0.344396	527.83	0.0000
AB	0.00998789	1	0.00998789	15.31	0.0001

AC	0.00998789	1	0.00998789	15.31	0.0001
AD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
AE	0.138892	1	0.138892	212.87	0.0000
BC	0.00183451	1	0.00183451	2.81	0.0950
BD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
BE	0.0255108	1	0.0255108	39.10	0.0000
CD	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
CE	0.0255108	1	0.0255108	39.10	0.0000
DE	0.0	1	0.0	0.00	1.0000
Error total	0.148112	227	0.000652475		
Total (corr.)	0.8886	242			

R-cuadrada = 83.332 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 82.2306 por ciento

Error estándar del est. = 0.0255436

Error absoluto medio = 0.0188804

Estadístico Durbin-Watson = 1.86883 (P=0.1538)

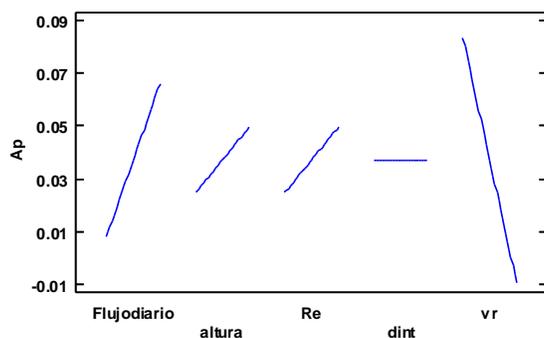
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.0639724

El StatAdvisor

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Ap en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 9 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 83.332% de la variabilidad en Ap. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 82.2306%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0255436. El error medio absoluto (MAE) de 0.0188804 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Gráfica de Efectos Principales para Ap



Coef. de regresión para Ap

Coeficiente	Estimado
constante	0.0370929
A:Flujodiario	0.02885
B:altura	0.0123643
C:Re	0.0123643
D:dint	0.0
E:vr	-0.0461075
AB	0.00961667
AC	0.00961667
AD	0.0
AE	-0.0358614
BC	0.00412143
BD	0.0
BE	-0.0153692
CD	0.0
CE	-0.0153692
DE	0.0

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$\begin{aligned}
 Ap = & 0.0370929 + 0.02885 * \text{Flujodiario} + 0.0123643 * \text{altura} + 0.0123643 * \text{Re} + 0.0 * \text{dint} - 0.0461075 * \text{vr} + \\
 & 0.00961667 * \text{Flujodiario} * \text{altura} + 0.00961667 * \text{Flujodiario} * \text{Re} + 0.0 * \text{Flujodiario} * \text{dint} - 0.0358614 * \text{Flujodiario} * \text{vr} + \\
 & 0.00412143 * \text{altura} * \text{Re} + 0.0 * \text{altura} * \text{dint} - 0.0153692 * \text{altura} * \text{vr} + 0.0 * \text{Re} * \text{dint} - 0.0153692 * \text{Re} * \text{vr} + 0.0 * \text{dint} * \text{vr}
 \end{aligned}$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

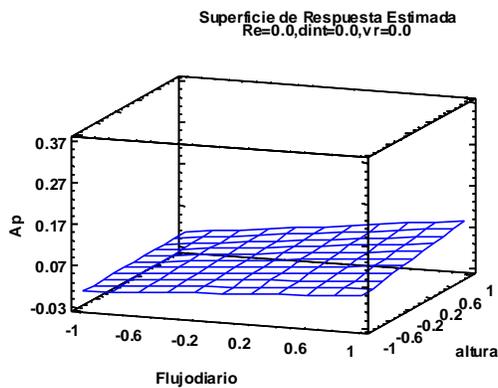
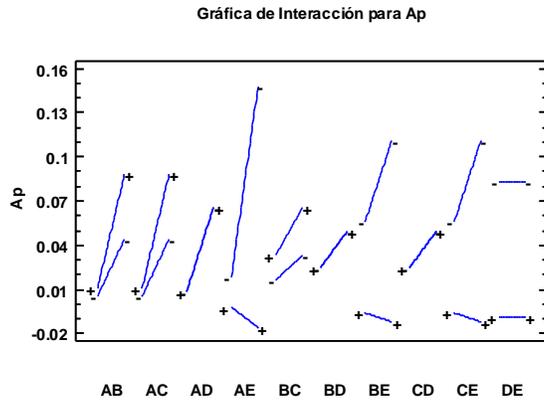
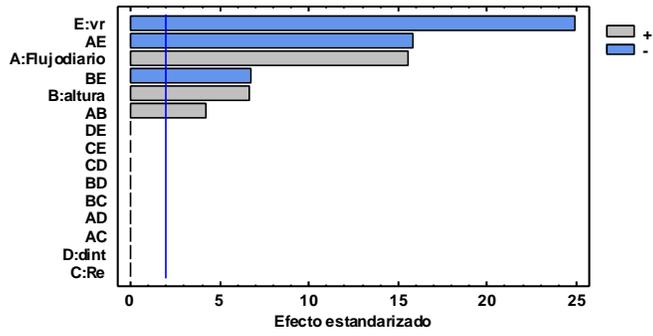
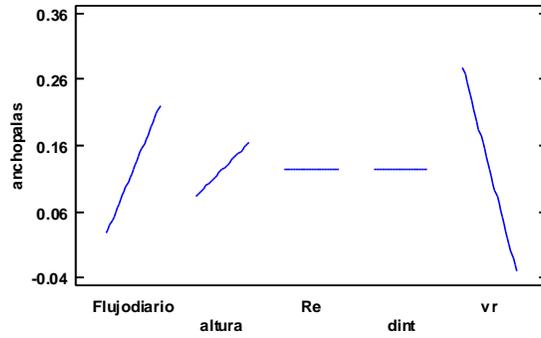


Diagrama de Pareto Estandarizada para anchopalas



Gráfica de Efectos Principales para anchopalas



Coef. de regresión para anchopalas

Coeficiente	Estimado
constante	0.123643
A:Flujodiario	0.0961667
B:altura	0.0412143
C:Re	0.0
D:dint	0.0
E:vr	-0.153692
AB	0.0320556
AC	0.0
AD	0.0
AE	-0.119538
BC	0.0
BD	0.0

BE	-0.0512305
CD	0.0
CE	0.0
DE	0.0

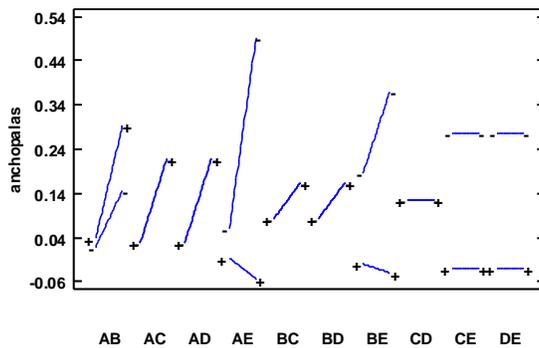
El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{anchopalas} = 0.123643 + 0.0961667 * \text{Flujodiario} + 0.0412143 * \text{altura} + 0.0 * \text{Re} + 0.0 * \text{dint} - 0.153692 * \text{vr} + 0.0320556 * \text{Flujodiario} * \text{altura} + 0.0 * \text{Flujodiario} * \text{Re} + 0.0 * \text{Flujodiario} * \text{dint} - 0.119538 * \text{Flujodiario} * \text{vr} + 0.0 * \text{altura} * \text{Re} + 0.0 * \text{altura} * \text{dint} - 0.0512305 * \text{altura} * \text{vr} + 0.0 * \text{Re} * \text{dint} + 0.0 * \text{Re} * \text{vr} + 0.0 * \text{dint} * \text{vr}$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

Gráfica de Interacción para anchopalas



Superficie de Respuesta Estimada
Re=0.0,dint=0.0,vr=0.0

