

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Metodología computacional para el diseño de cámaras en espiral de turbinas hidráulicas

Jonathan Andrés Graciano Uribe

**Este trabajo se presenta como requisito parcial para obtener el grado de:
Ingeniero(a) en Mecatrónica**

**Facultad de ingenierías
Ingeniería Mecatrónica**

Asesor

Diego Andrés Hincapié Zuluaga

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO – ITM
MEDELLÍN - COLOMBIA**

2015

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

"La espiral es un círculo espiritualizado. En la forma espiral, el círculo, desenrollado, devanado, ha dejado de ser vicioso... La vuelta sigue a la vuelta, y toda síntesis es la tesis de la nueva serie..."

Vladimir Nabokov

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

RESUMEN

El desarrollo sostenible se basa en tres pilares inseparables fundamentales que son el desarrollo social, económico y la protección del medio ambiente con el fin de garantizar la dignidad humana para todos, la falta de energía eléctrica en pequeñas comunidades aisladas es a menudo un obstáculo para el desarrollo socio-económico al no tener sistemas de generación de energía eléctrica/mecánica amigables con el medio ambiente con potencias no superiores a 100 kW, como es el caso de los sistemas modulares de micro generación hidráulica, este obstáculo puede ser superado y relegado.

Este trabajo muestra cómo se emplean las herramientas computacionales con el fin de realizar un diseño geométrico preciso y fiel de las cámaras en espiral de las turbinas hidráulicas de reacción. Se parte de las ecuaciones características de curvas planas como las espirales Fermat, logarítmica, Arquímedes, galileo y polinómica, llegando a un modelo matemático, el cual por medio de rutinas en Matlab® se obtienen puntos espaciales que dan forma de secciones transversales a través de su trayectoria en configuración espiral con sus coordenadas espaciales y a su vez organiza estas posiciones en el plano para obtener un formato de texto predeterminado, que puede ser reconocido por software de modelamiento ingenieril (Parametric 3.0, Siemens NX 9.0, Ansys, entre otros) y así por medio de modelado avanzado construir la geometría de forma precisa de la cámara en espiral. Teniendo de esta manera modelos funcionales que pueden ser empleados en la simulación fluido dinámica o estructural que permitirán analizar su desempeño o comportamiento dentro de las diferentes geometrías en condiciones estándar.

Palabras clave: Cámaras en espiral, herramientas computacionales, modelado avanzado, micro-generación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

RECONOCIMIENTOS

Mi sentido agradecimiento a los profesores Diego Andrés Hincapié Zuluaga, Juan José Arbeláez, Juan Gonzalo Ardila Marín y Edwar Andrés Torres por el acompañamiento presentado durante gran parte de la carrera, apoyando y aportando tanto a nivel de conocimiento como a nivel personal y profesional, con el fin de generar para nosotros mejores oportunidades en la vida, además de formarnos de manera integral y ética durante nuestro proceso de aprendizaje.

Este agradecimiento se hace extensivo al semillero de investigación de Computación Avanzada y Diseño Digital (CADD) por permitirnos el espacio, los equipos y los conocimientos de sus integrantes, durante gran parte de nuestra estadía en la institución, agradeciendo además al grupo de Materiales Avanzados y Energía (MATyER) por la acogida y las ayudas generadas hacia nosotros en las diferentes actividades realizadas dentro del semillero.

A mi familia fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y en mis años de carrera profesional y en especial quiero expresar mi más grande agradecimiento a mi madre que sin su ayuda hubiera sido imposible culminar mi profesión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

ACRÓNIMOS

ONU Organización de las Naciones Unidas

PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

RES Fuentes de Energía Renovables

MHP Micro Hidroeléctricas

DG Generación Distribuida

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Generalidades	7
1.2 Objetivos	9
1.2.1 General	9
1.2.2 Especifico	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Micro generación hidráulica	10
2.2 Cámaras en espiral	12
3. METODOLOGÍA	15
3.1 Parametrización de ecuaciones características	15
3.2 Generación de rutinas en Matlab®	19
3.3 Generación de geometrías de cámaras en espiral	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	35
REFERENCIAS	36
APÉNDICE	38

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

1. INTRODUCCIÓN

Esta sección se divide en tres partes: generalidades, donde se presenta de manera resumida la pertinencia, justificación y problema abordado; objetivo, donde se escribe textualmente los objetivos, general y específicos y organización de la tesis donde se describe lo que aborda cada uno de los capítulos de la tesis.

1.1 GENERALIDADES.

De los ocho (8) objetivos fundamentales de la cumbre del milenio del año 2000, dos de ellos hacen referencia directa con la energía como pilar fundamental en el desarrollo humano, estos objetivos son:

“Erradicar la pobreza extrema y el hambre”
“Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”,

La ONU reconoce explícitamente la dependencia recíproca entre el crecimiento, la reducción de la pobreza y el desarrollo sostenible (ONU, 2000).

En Colombia se estableció el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para despertar una mayor conciencia y verificar los progresos realizados a lo que concierne a la Declaración del Milenio, para nuestro país se establecieron 7 temas estratégicos que contribuyen a desarrollar PNUD, estos son:

- Gobernabilidad Democrática.
- Paz, Desarrollo y Reconciliación.
- Superación de la Pobreza.
- Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Gestión Integral del Riesgo.
- Equidad de Género.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

- Informe Nacional de Desarrollo Humano.

Dentro de los temas “Superación de la Pobreza” y “Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible” se proponen algunos frentes de trabajo como lo son el desarrollo económico e incluyente, mercados inclusivos, cambio climático y biodiversidad esto desde el ámbito internacional.

En el ámbito nacional paralelamente a lo anterior, el uso de las energías renovables a gran escala es uno de los grandes desafíos del hombre del siglo XXI, se prevé que para el 2030 las energías alternativas aportarán al menos un 30 % de la capacidad requerida por la humanidad; las pequeñas centrales hidráulicas se convierten en una atractiva opción para la solución de requerimientos energéticos en el país (Upme, 2009), en el ámbito local se promueve proyectos de ciencia, tecnología e innovación entre el sector académico y sectores productivos y sociales, en especial en las tres cadenas productivas prioritarias, salud, energía y tecnologías de la información y de la comunicación (Pineda, Scheel, & Gipe, 2011).

En la actualidad existen diferentes maneras de generar energía eléctrica: hidráulica, eólica, fotovoltaica y nuclear, entre otras (Bhat & Prakash, 2009), en Colombia, gracias a su riqueza hidrográfica, la mayor parte de la energía eléctrica que se genera es por medio de propulsión hidráulica (Agudelo, 2012). Para la generación de este tipo de energía, existen dos tipos de turbinas: Turbinas de acción; son aquellas que requieren que la energía cinética del fluido se convierta en potencia de eje por medio de un inyector y cangilón o alabe. Turbinas de reacción; requieren que la energía de flujo se convierta en potencia de eje, esto se realiza en un espacio que no tiene una conexión a la atmósfera, donde uno de los elementos constitutivos de este espacio es la cámara en espiral, en la cual se centrará el desarrollo de este trabajo.

Las cámaras en espiral son elementos relevantes en la estructura de las turbinas hidráulicas de reacción (francis, kaplan, hélice y deriaz), encargadas de distribuir el agua por toda la periferia del rodete de dichas turbinas (López S, 2003). A su vez, éstas se encargan de cambiar el flujo lineal que llega a la entrada de la cámara por un flujo radial y tangencial, el cual será entregado a la salida de la cámara, para ser aprovechado por los alabes de la turbina. En el proceso de interacción entre fluido y turbina, existe un intercambio de momento lineal y angular del par, momento de eje y velocidad de rotación en el eje turbina, donde el producto entre estas dos últimas cantidades, es la potencia de eje.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

El diseño y la construcción de las cámaras en espiral, para su aplicación en la generación eléctrica por medio de microcentrales, es precaria. El esbozo de estas cámaras se realiza por ensayo y error, lo que acarrea costos elevados y en la mayoría de los casos diseños ineficientes. A través de este trabajo se pretende establecer una metodología para la generación de geometrías optimas de cámaras en espiral utilizando ecuaciones características como la de Fermat, logarítmica, Arquímedes, galileo y polinómica por medio de herramientas computacionales de programación y modelado que consumen menor potencia de cálculo, ya que los programas CADD existentes no permiten desarrollar paramétricamente superficies.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 General

Desarrollar una metodología empleando herramientas computacionales con el fin de realizar un diseño geométrico preciso y fiel de las cámaras en espiral de las turbinas hidráulicas de reacción, partiendo de las ecuaciones características como la de Fermat, logarítmica, Arquímedes, galileo y polinómica, para alcanzar un banco de geometrías para su posterior investigación fluido dinámica o estructural y así evaluar su desempeño y eficiencia hidráulica.

1.2.2 Específicos

- Parametrizar ecuaciones características de espirales para llevarlas a rutinas de Matlab® para su tratamiento matemático.
- Identificar y establecer rutinas de Matlab®, para la creación de puntos espaciales de un esqueleto de la cámara en espiral con base a ecuaciones características parametrizadas.
- Desarrollar procedimientos adecuados por medio de modelado avanzado para diseñar la geometría de forma precisa de la cámara en espiral.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

2. MARCO TEÓRICO

En este proyecto convergen dos áreas del conocimiento que son: micro generación hidráulica y las cámaras en espiral, por este motivo se trabaja en apartados independientes cada uno de sus marcos teóricos.

2.1 Micro generación hidráulica

En la última década, los problemas relacionados con los factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático), la demanda eléctrica (un crecimiento significativo) y restricciones de los mercados mayoristas han surgido en todo el mundo. Estas dificultades, lejos de encontrar soluciones eficaces, están aumentando continuamente, lo que sugiere la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar su solución. Una de estas alternativas tecnológicas se llama generación distribuida (*Distributed Generation*, DG), y consiste en la generación de energía eléctrica lo más cerca posible del lugar de consumo, de hecho, como se hizo en los inicios de la industria eléctrica, pero ahora se incorporan las ventajas de la tecnología moderna. Aquí se consolida la idea de utilizar fuentes de energía renovables (*Renewable Energy Sources*, RES) que no causan contaminación ambiental, como la energía eólica, fotovoltaica, hidráulica, entre otras (Márquez, Molina, & Pacas, 2010). Hoy en día, la utilización de RES coincide con la creciente demanda de energía eléctrica y está determinada por las preocupaciones ambientales, el agotamiento de los combustibles fósiles y también por los aspectos económicos y sociales (Ion & Marinescu, 2011). En los últimos años, se ha dado un creciente interés en la integración de la red de micro hidroeléctricas (*Micro Hydro Power*, MHP) porque son una tecnología probada con una actuación muy buena y viable, con bajos costos de inversión, lo que resulta en la tecnología basada en RES con menores costos, incluso cuando se las compara con la generación eólica. Se espera que esta tendencia se incremente aún más debido a los incentivos favorables en muchos países y retribuciones a la reducción de emisiones de carbono (Márquez et al., 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Una clasificación común de las MHP es:

1. Micro-hidroeléctricas (hasta 100 kW).
2. Mini-hidráulica (101 kW a 1 MW).
3. Pequeñas centrales hidroeléctricas (1-25 MW).

Sin embargo, el término MHP se utiliza para describir todos los proyectos hidroeléctricos de hasta 25 MW de capacidad. De las aldeas sin electricidad en un país para muchas no es posible la electrificación a través de la extensión de la red convencional en un futuro próximo, ya que la mayoría se encuentran en zonas remotas, bosque, desierto montañoso, islas y las regiones tribales. Se propone abastecer con electricidad a todos estos pueblos mediante el aprovechamiento de RES disponibles localmente a través de tecnologías como los sistemas de energía solar fotovoltaica (PVS – *Photo Voltaic System*), gasificadores de biomasa y los proyectos de MPH (Nouni, Mullick, & Kandpal, 2006).

La aplicación de MHP ha atraído la atención mundial durante las últimas décadas del siglo XX. A pesar de que las MHP no son comparables a las grandes centrales hidroeléctricas en su capacidad de producción de energía, su diseño y procesos de fabricación sencillos, bajo coste por kW, fácil instalación sin necesidad de actividades de construcción pesada y fácil mantenimiento y sus impactos mínimos, las han hecho atractivas para los países ricos en potencial hídrico. Un requisito previo para los grandes potenciales hidroeléctricos es la construcción de represas a gran escala, así como todos los demás edificios e instalaciones con el fin de la generación, regulación y transmisión de energía, lo que requiere fuertes inversiones de mediano y largo plazo, así como largos procesos de construcción, además puede tener efectos adversos en los ecosistemas antes y después del punto donde se levanta la presa, puede inundar tierras agrícolas valiosas y privar a las actividades agrícolas de las aguas que necesitan; esto hace desfavorable la aplicación de grandes hidroeléctricas, una alternativa viable es la aplicación de las MHP (Yassi & hashemloo, 2010).

Las MHP tienen algunas ventajas sobre otras RES. Los ríos son una fuente más concentrada de energía que, por ejemplo, los vientos para la energía eólica o el sol para la energía solar. La energía suministrada por una instalación MHP está continuamente disponible y la cantidad es previsible si las fluctuaciones estacionales del flujo de agua se conocen. Las emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x son

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

muy bajos durante la vida útil del sistema, además, la tecnología requiere poco mantenimiento y es de larga duración (aproximadamente 50 años). Las MHP son unas de las más baratas con costos de 20,7 ¢US/kWh, comparables con 12,8 ¢US/kWh para un gasificador de biomasa pequeño, 15-35 ¢US/kWh para una pequeña turbina eólica y 40-60 ¢US/kWh para un sistema solar en casa (Drinkwaard, Kirkels, & Romijn, 2010).

Algunos autores se han dedicado a proponer sistemas de apoyo a las decisiones para la creación de MHP en la región amazónica en una perspectiva de desarrollo sostenible. Proponen metodologías para analizar los proyectos de MHP para las pequeñas comunidades aisladas de la Amazonia brasileña (Blanco, Secretan, & Mesquita, 2008). La capacidad instalada de toda la India fue 107.533,7 MW en 2003 de la cual las contribuciones de la energía hidroeléctrica, térmica, nuclear y eólica fueron 26660,2; 76525,1; 2,720 y 1628,36 MW, respectivamente. Aunque el potencial hídrico total en el país se estima en 150.000 MW, sólo un 17,8 % ha sido explotado hasta ahora, que aporta aproximadamente el 24,8 % de la potencia total instalada. Cerca de 5,48% de la capacidad total de generación de energía hidroeléctrica es una contribución de 453 MHP instaladas en el país (Yassi & hashemloo, 2010).

2.1 Cámaras en espiral

Son un componente que se encuentra en todas las turbinas hidráulicas de reacción. Las dos funciones principales de este elemento son:

- Distribuir el agua por toda la periferia del rodete a través de un componente fijo llamado pre distribuidor y de componente móvil llamado distribuidor.
- Transformar parte de la energía de presión del fluido en energía cinética.

Según las dimensiones de la turbina se construye de acero colado, fundición, chapa sujeta con roblones remachados u hormigón armado (solo o blindado con chapa para evitar fugas) (Mataix, 1986).

Es posible observar en la Fig.1 cámaras en espiral listas para su instalación, de acero colado, por secciones para estaciones hidráulicas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16



Fig. 1. Cámara en espiral (Faeitch2012, n.d.)

Para el diseño de las trayectorias se abordó el método geométrico, dicho método se basa en las siguientes suposiciones, la caja en espiral sigue la forma de las siguientes ecuaciones características de espirales matemáticas.

$$\textit{Galileo} \rightarrow r = c\theta^2 + k \quad \text{Ec(1)}$$

$$\textit{Fermat} \rightarrow r = c\sqrt{\theta} + k \quad \text{Ec(2)}$$

$$\textit{Hiperbólica} \rightarrow r = \frac{c}{\theta} + k \quad \text{Ec(3)}$$

$$\textit{Logarítmica} \rightarrow r = ce^{\theta} + k \quad \text{Ec(4)}$$

$$\textit{Arquímedes} \rightarrow r = c\theta + k \quad \text{Ec(5)}$$

$$\textit{Polinómica} \rightarrow r = c_n\theta^n + c_{n-1}\theta^{n-1} + \dots + c\theta + k \quad \text{Ec(6)}$$

Donde;

r = radio de la trayectoria de la espiral.

c = constante de proporcionalidad.

k = constante de compensación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Dichas ecuaciones se definen como el lugar geométrico moviéndose a velocidad constante sobre una recta que gira sobre un punto de origen fijo, está formada por empalmes de arcos en coordenadas polares (r, θ) siendo c y k números reales de los cuales c es la proporcionalidad de la espiral y k es la compensación o centro de inicio de la espiral.

La forma de sus secciones transversales de entrada están diseñados para dar un momento de impulso para el agua con respecto al eje de la turbina de la sección en la que el agua entra en la espiral (Athanassiadis, 1990).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

3. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo presenta tres capítulos, los cuales son: Parametrización de ecuaciones características de espirales, generación rutinas en Matlab® para la creación de puntos espaciales de un esqueleto de la cámara en espiral y por ultimo desarrollar procedimientos adecuados por medio de modelamiento avanzado para diseñar la geometría de forma precisa del fluido de la cámara en espiral.

3.1 Parametrización de ecuaciones características

Partiendo de las ecuaciones características de las espirales en coordenadas polares (r, θ) se parametrizan para representar la trayectoria en el espacio vectorial \mathbb{R}^2 , es tomada como ejemplo una espiral arbitraria $r=\theta$; su trayectoria parametrizada en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$X = r * \cos(t) \quad Ec(7)$$

$$Y = r * \sin(t) \quad Ec(8)$$

Siendo t el ángulo de recorrido de la espiral, con la ayuda de un programa (Matlab®, geogebra, etc) se puede hacer un bosquejo de la trayectoria en coordenadas cartesianas dando como parámetros a t como un vector "0:1:720" (Inicio:Resolución:Final), podemos visualizar el recorrido de la trayectoria de la espiral, véase Fig. 2.

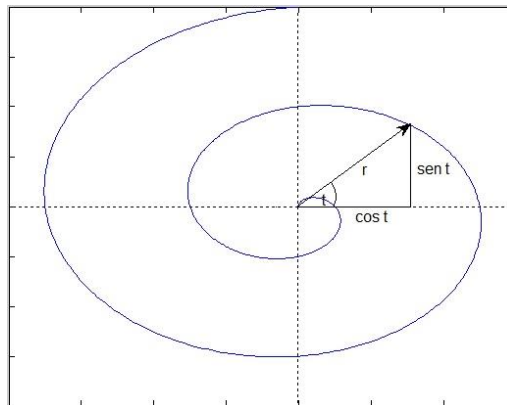


Fig. 2. Trayectoria de la espiral en espacio vectorial \mathbb{R}^2

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Los parámetros realizados para la visualización de las trayectorias de las ecuaciones características se realizaron con la valores de $c=1$, $k=0$ para observar la trayectoria sin ninguna compensación o proporcionalidad, véase tabla 1.

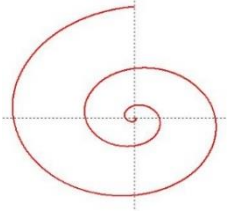
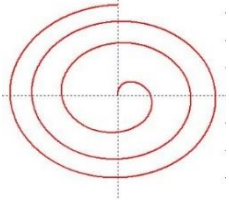
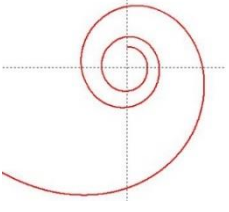
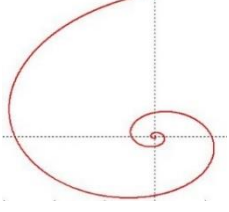
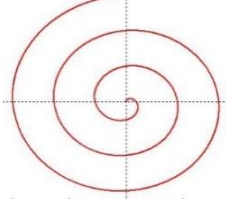
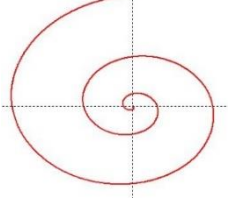
Espiral	Ecuación	Parametrización	Trayectoria
Galileo	$r = c\theta^2 + k$	$\theta = 0:1:1080$ $x = \theta^2 * \cos(\theta)$ $y = \theta^2 * \text{sen}(\theta)$	
Fermat	$r = c\sqrt{\theta} + k$	$\theta = 0:1:1080$ $x = \sqrt{\theta} * \cos(\theta)$ $y = \sqrt{\theta} * \text{sen}(\theta)$	
Hiperbólica	$r = \frac{c}{\theta} + k$	$\theta = 1:1:1081$ $x = -\frac{1}{\theta} * \cos(\theta)$ $y = \frac{1}{\theta} * \text{sen}(\theta)$	
Logarítmica	$r = ce^{\theta} + k$	$\theta = 0:1:1080$ $x = 1.05^{\theta} * \cos(\theta)$ $y = 1.05^{\theta} * \text{sen}(\theta)$	
Arquímedes	$r = c\theta + k$	$\theta = 0:1:1080$ $x = \theta * \cos(\theta)$ $y = \theta * \text{sen}(\theta)$	
Polinómica	$r = c_n\theta^n + c_{n-1}\theta^{n-1} + \dots + c\theta + k$	$\theta = 0:1:1080$ $x = (\theta^2 + \theta) * \cos(\theta)$ $y = (\theta^2 + \theta) * \text{sen}(\theta)$	

Tabla 1. Trayectoria de las espirales.

Con el fin de generar una comparación más clara en el comportamiento de las trayectorias de las distintas espirales, expuestas previamente, estas son graficadas en el mismo plano, los valores de compensación y proporcionalidad son ajustados para las distintas ecuaciones de las espirales, de forma tal que estas sean visibles dentro de la misma proporción, véase Fig. 3.

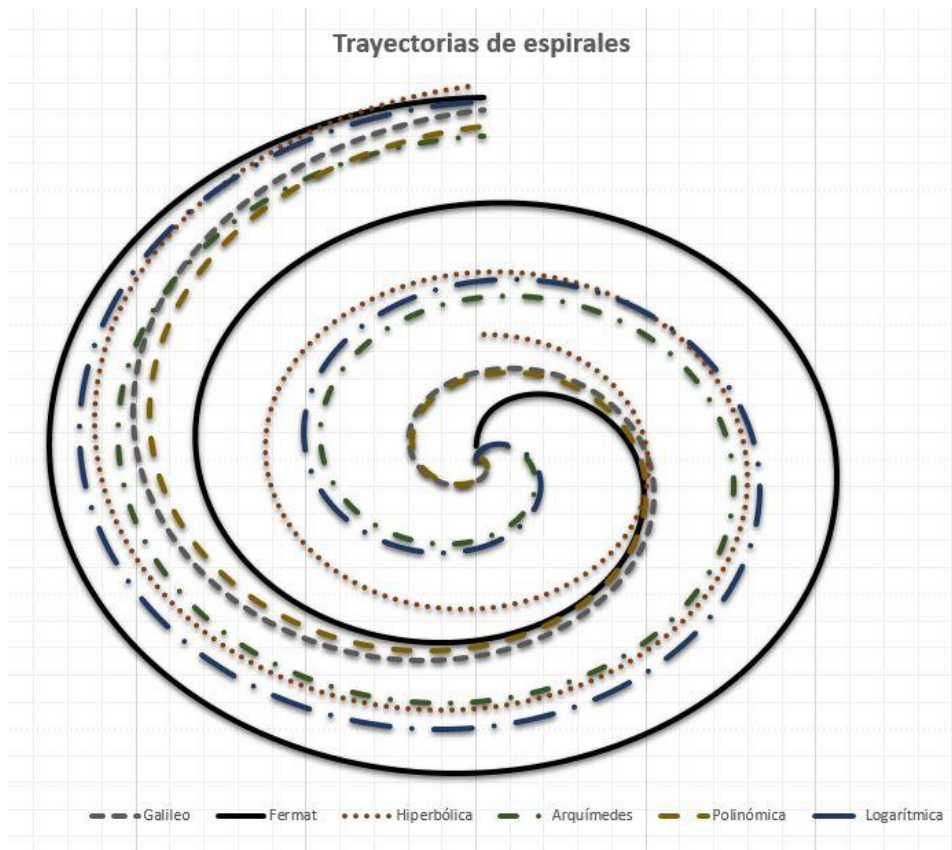


Fig. 3. Comparación de trayectorias de ecuaciones de las trayectorias de espirales

Continuamos con la creación de secciones transversales por medio de una nube de puntos tridimensionales que forman un esqueleto estructural siguiendo la trayectoria de la espiral, dichas secciones son obtenidas por la generación de circunferencias, las cuales tienen por centro, los puntos que definen la trayectoria de la espiral en cada θ , el radio de la sección transversal de cada circunferencia varía acorde al radio de la trayectoria, véase Fig. 4.

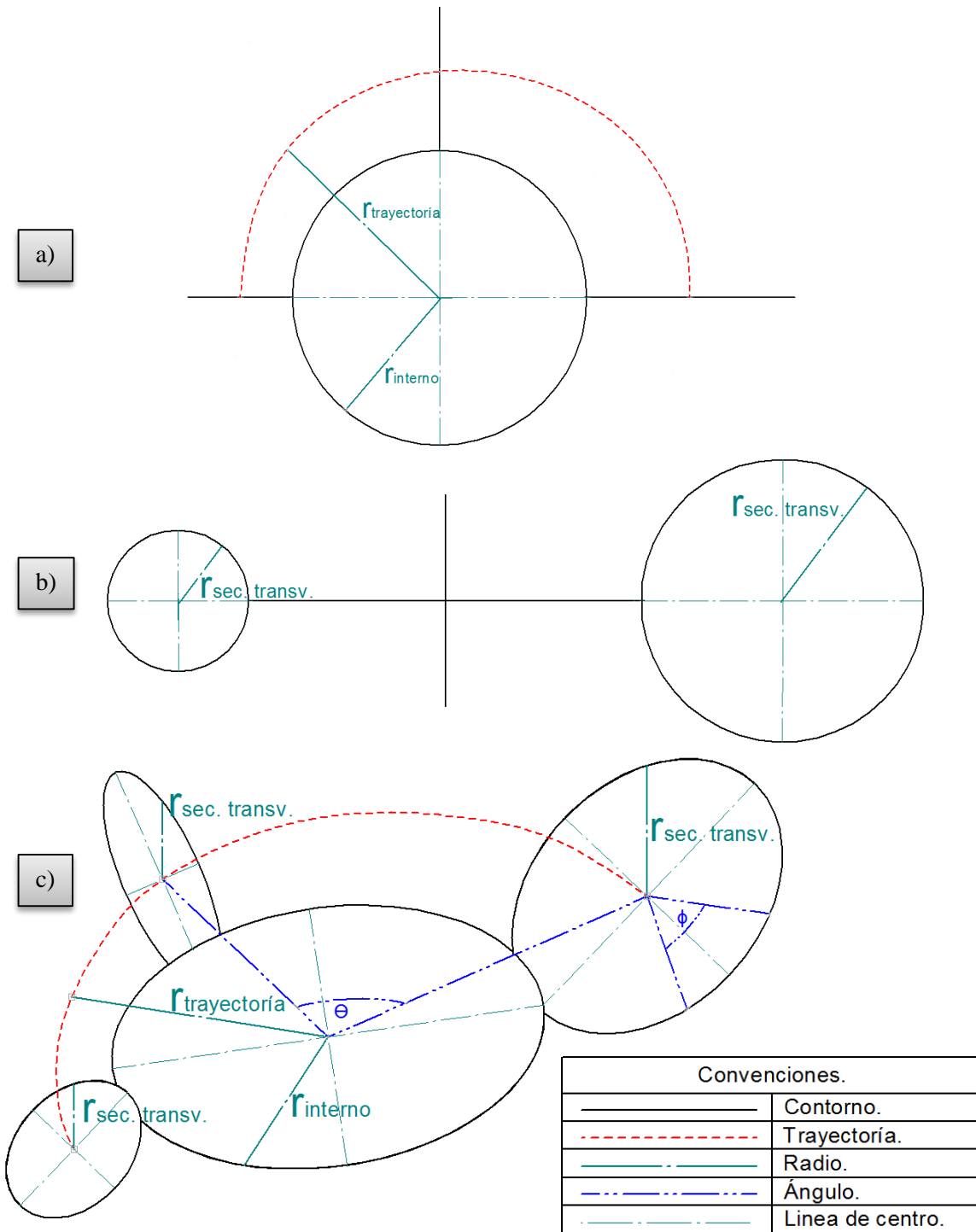


Fig. 4. Creación de secciones transversales, a) vista superior, b) vista frontal, c) vista isométrica.

Para hallar el radio de la sección transversal, véase Ec (9).

$$r_{\text{sec.transv}} = r_{\text{trayectoria}} - r_{\text{interno}} \quad Ec(9)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Donde;

$r_{trayectoria}$ = radio que varía respecto a Θ .

$r_{interno}$ = radio constante, el cual determina la circunferencia de salida de la cámara de espiral.

Lo anterior es obtenido, usando un sistema de coordenadas polares, luego el resultado es transformado en coordenadas rectangulares \mathbb{R}^3 , la circunferencia de la sección transversal parametrizada en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$X = (r_{trayectoria} + r_{sec.transv} * \cos(\varphi)) * \cos(\theta) \quad Ec(10)$$

$$Y = r_{sec.transv} * \sin(\varphi) \quad Ec(11)$$

$$Z = (r_{trayectoria} + r_{sec.transv} * \cos(\varphi)) * \sin(\theta) \quad Ec(12)$$

3.2 Generación de rutinas en Matlab®

La estructura del código de Matlab® está conformado por 4 fases importantes las cuales son:

- Declaración de variables.
- Ciclo encargado de generar la trayectoria.
- Ciclo anidado el cual genera la sección transversal y genera nube de puntos con dicha sección.
- Exportación del esqueleto de la cámara.

Las 4 fases antes mencionadas son descritas en un diagrama de flujo, véase Fig. 5.

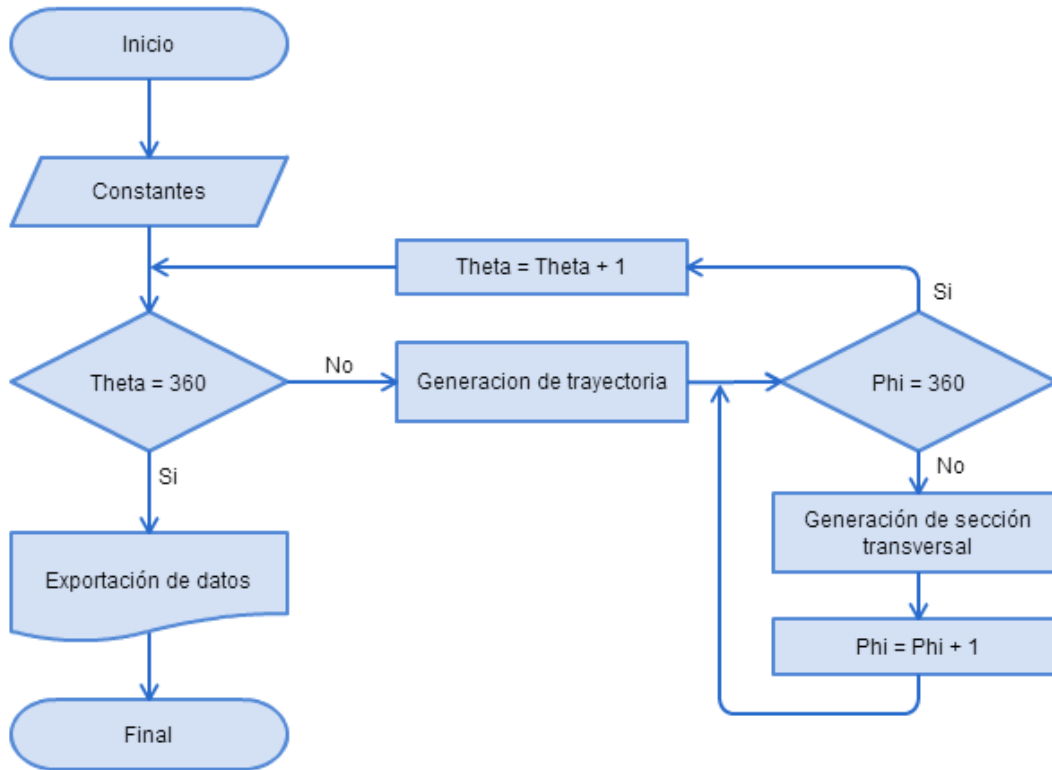


Fig. 5. Diagrama de flujo de la estructura de la rutina.

La primer parte de las rutinas viene dada por los parámetros de entrada, estos parámetros de entrada son:

- Estado inicial de contadores por medio de un vector “0:5:360”
(Inicio:Resolucion:Final)
- Radio interior “constante”
- Radio exterior “parámetro utilizado para el radio de la entrada de la espiral”
- K constante de *offset* dada por: $r_{interior} + \frac{r_{exterior}}{2}$ Ec(13).
- C: constante de proporcionalidad es obtenida por medio del despeje de cada ecuación, para la espiral Polinómica es un caso especial, el cual se debe tener en cuenta el grado el cual se va a parametrizar, ya que sus constantes son directamente proporcionales a su grado, en nuestro caso será grado 2, véase tabla 2.

Espiral	Ecuación	Despeje
Galileo	$r = c\theta^2 + k$	$c = \frac{r-k}{\theta^2}$
Fermat	$r = c\sqrt{\theta} + k$	$c = \frac{r-k}{\sqrt{\theta}}$
Hiperbólica	$r = \frac{c}{\theta} + k$	$c = (r-k)*\theta$
Logarítmica	$r = ce^{\theta} + k$	$c = \frac{r-k}{e^{\theta}}$
Arquímedes	$r = c\theta + k$	$c = \frac{r-k}{\theta}$
Polinómica	$r = c_3\theta^3 + c_2\theta^2 + c\theta + k$	$c_3 = \frac{r-k}{\theta^3} (*)$

Tabla 2. Obtención de la constante C, con base a las ecuaciones de las espirales.

(*) El grado de la ecuación de la espiral polinómica es de tres (3), esto conlleva a tener tres (3) constantes (C_1, C_2, C_3) para encontrar el valor de dichas constantes se recurrió al método de valores en la frontera el cual derivamos la ecuación con respecto a θ , hasta tener el mismo número de ecuaciones que de incógnitas y nuestro valor de frontera es $\theta(0)=0$, dando como resultado C_1 y C_2 igual a cero (0).

La segunda parte de la rutina desarrollada en Matlab® está dado por un ciclo el cual genera el radio de la trayectoria de la espiral con base a θ .

La tercera parte está dado por un ciclo anidado dentro de la generación del radio de la trayectoria, el cual calcula el radio de la sección transversal, véase Ec (9) y genera puntos en coordenadas X,Y,Z, véase Ec (10,11,12). Estos puntos son escritos en una base de datos con estas coordenadas espaciales.

La última parte de exportación de datos, está dado bajo un formato (.ibl) el cual tiene una configuración de cada sección transversal, por posición, coordenadas X, Y, Z, véase Fig. 6.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```

open
arclength
begin section !1
begin curve
"1.000      227.202      0.000      0.000  "
"2.000      227.003      4.550      0.000  "
"3.000      226.408      9.065      0.000  "
"4.000      225.423     13.511     0.000  "
"5.000      224.053     17.854     0.000  "
  ⋮
  ⋮
  ⋮
begin section !2
begin curve
"1.000      224.983      0.000     19.683  "
"2.000      224.788      4.492     19.666  "
"3.000      224.203      8.949     19.615  "
"4.000      223.234     13.339     19.530  "
"5.000      221.887     17.627     19.413  "
  ⋮
  ⋮
  ⋮
  
```

Fig. 6. Configuración del archivo (.ibl).

3.3 Generación de geometrías de cámaras en espiral

El desarrollo de la geometría fue llevado a cabo empleando puntos espaciales que dan forma de secciones transversales a través de su trayectoria en configuración espiral con sus coordenadas espaciales y a su vez organiza estas posiciones en el plano para obtener un formato de texto predeterminado (.ibl), que puede ser reconocido por el software de modelamiento ingenieril, en este caso implementaremos Creo Parametric 3.0.

Como primer paso crearemos una archivo en Creo parametric 3.0, en la barra de herramientas de acceso rápido se encuentra la opción de nuevo, al darle clic, seleccionamos el tipo que deseamos crear, en este caso es pieza y subtipo sólido, ingresamos un nombre y le damos en aceptar, ingresamos a la interfaz de diseño, proseguimos importando la curva generada por los puntos espaciales, se encuentra en la barra de herramientas, véase Fig. 7.



Fig.7. importación de curva.

A continuación vamos al origen del archivo .IBL el cual contiene los puntos espaciales de la cámara en espiral, y seleccionamos curva como tipo de importación véase Fig. 8.



Fig. 8. Ubicación del fichero .IBL

Si el procedimiento es correcto se importara una curva realizada por puntos espaciales en forma de espiral como se observa en la Fig. 9, de lo contrario repetir los pasos anteriores.

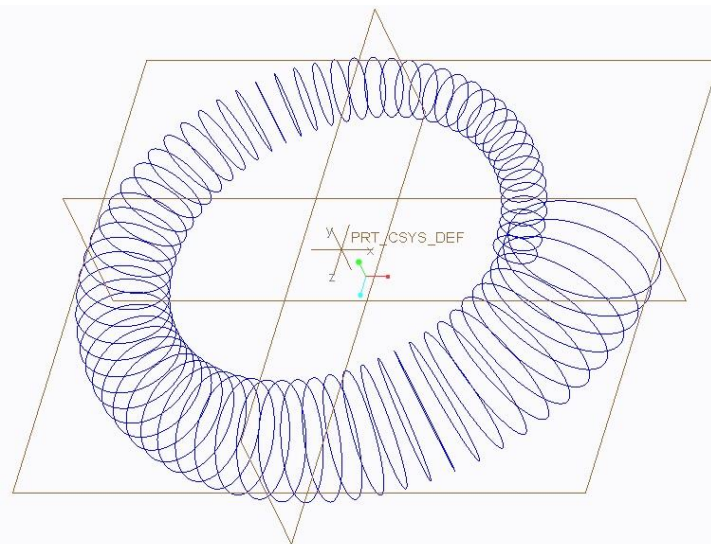


Fig. 9. Curvas en el espacio de la cámara en espiral.

A partir de este punto el diseño de las cámaras en espiral es diferente para un estudio fluido-dinámico el cual la geometría a estudiar es el volumen de agua que se encuentra en el interior de la

cámara en espiral y la geometría para el estudio mecánico por elementos finitos es la carcasa de la cámara.

Después de tener las curvas en el espacio, procedemos a crear la superficie de la cámara en espiral, esto lo hacemos por medio de mezcla de límites que se encuentra en la barra de herramientas de modelado, elegimos el plano (XY), continuamos seleccionando la primera curva, para seleccionar la próxima curva debemos presionar la tecla Ctrl, véase Fig. 10a, este procedimiento se debe hacer para la mitad de la geometría en total son 37 capas, para 3d véase Fig. 10b. y 2d véase Fig. 10c.

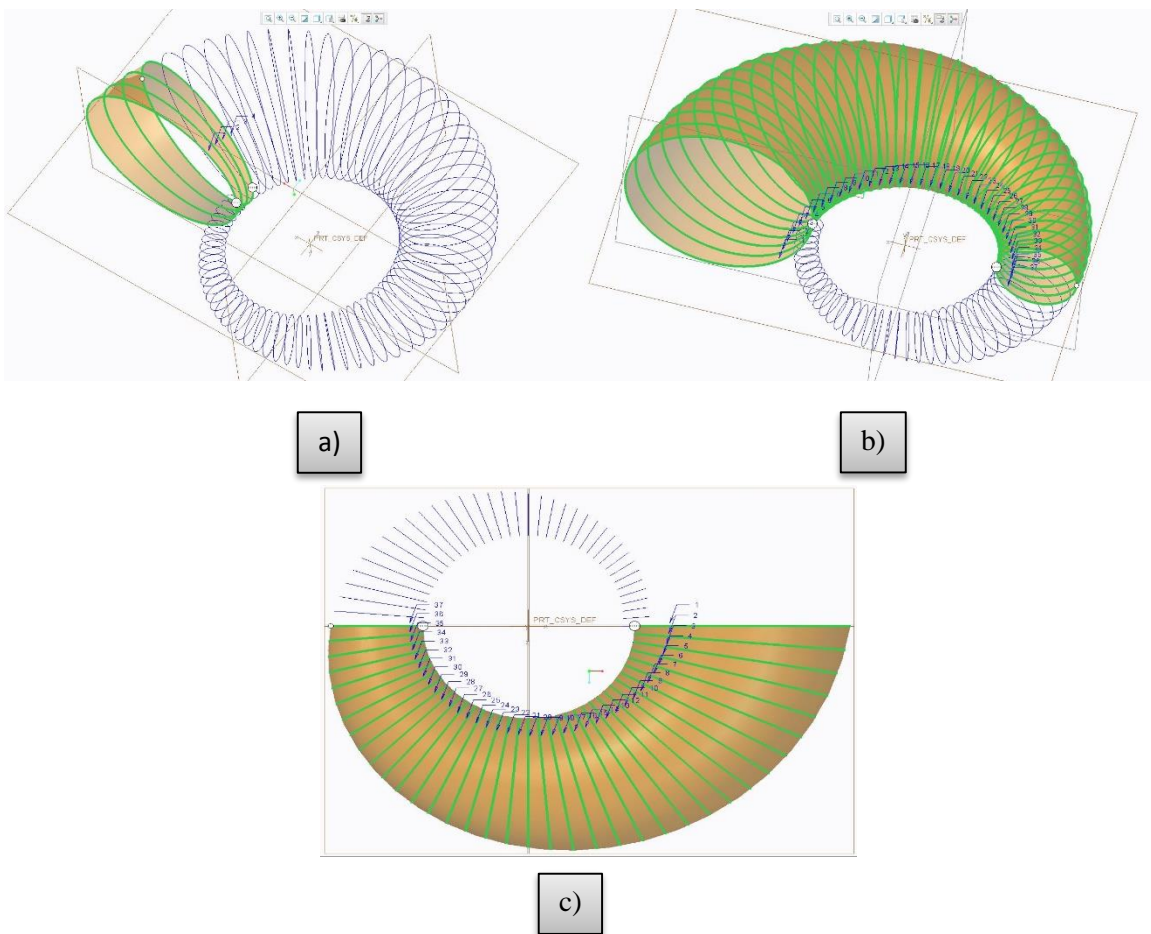


Fig. 10. a) selección de capas mediante mezcla de límites, b) 37 capas seleccionadas 3D, c) 37 capas seleccionadas 2D.

Seguimos creando una función de superficie plana (tapas), para esto damos clic en rellenar, seleccionamos el plano donde están las curvas a rellenar, inmediatamente nos lleva a la interfaz de esbozo, damos clic en proyectar véase Fig. 11.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16



Fig. 11. opción de proyectar.

Elegimos el tipo de arista, optamos por bucle y seleccionamos la curva a rellenar véase Fig. 12.

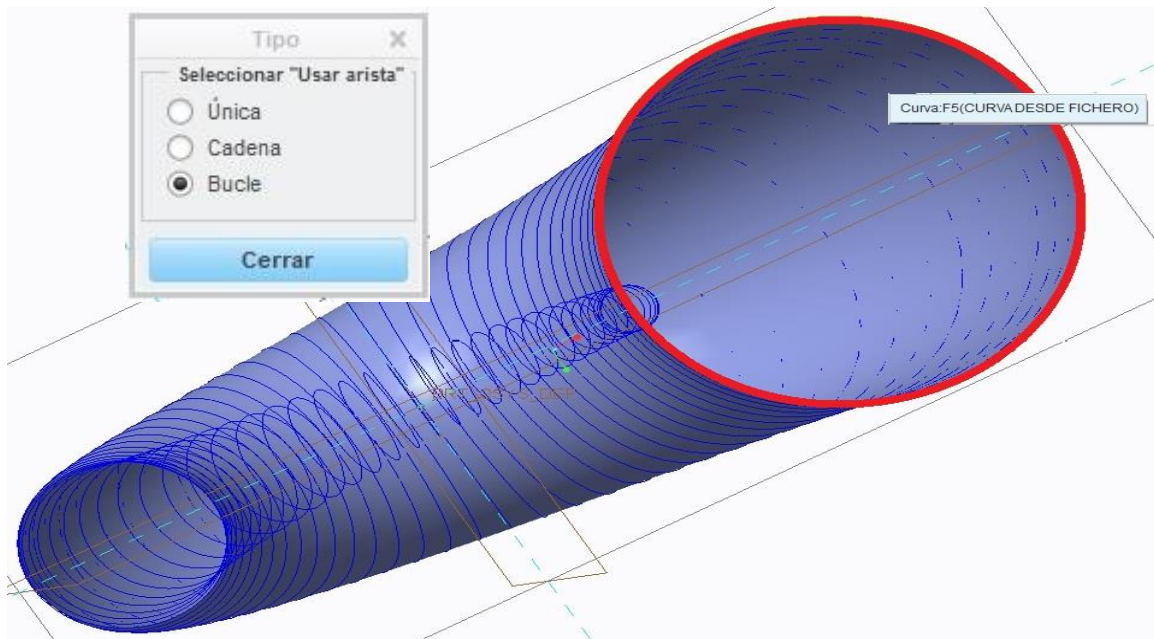


Fig. 12. selección de la curva a rellenar mediante bucle.

Damos clic en aceptar y guardar cambios, se debe haber rellenado la curva seleccionada, véase la Fig.13a. Realizamos los mismos pasos para rellenar la última curva que se encuentra en el mismo plano, en la Fig. 13b. se puede observar las dos curvas rellenadas y los procesos de diseño realizados hasta el los cuales son:

- importación de curva
- mezcla de límites
- dos rellenos

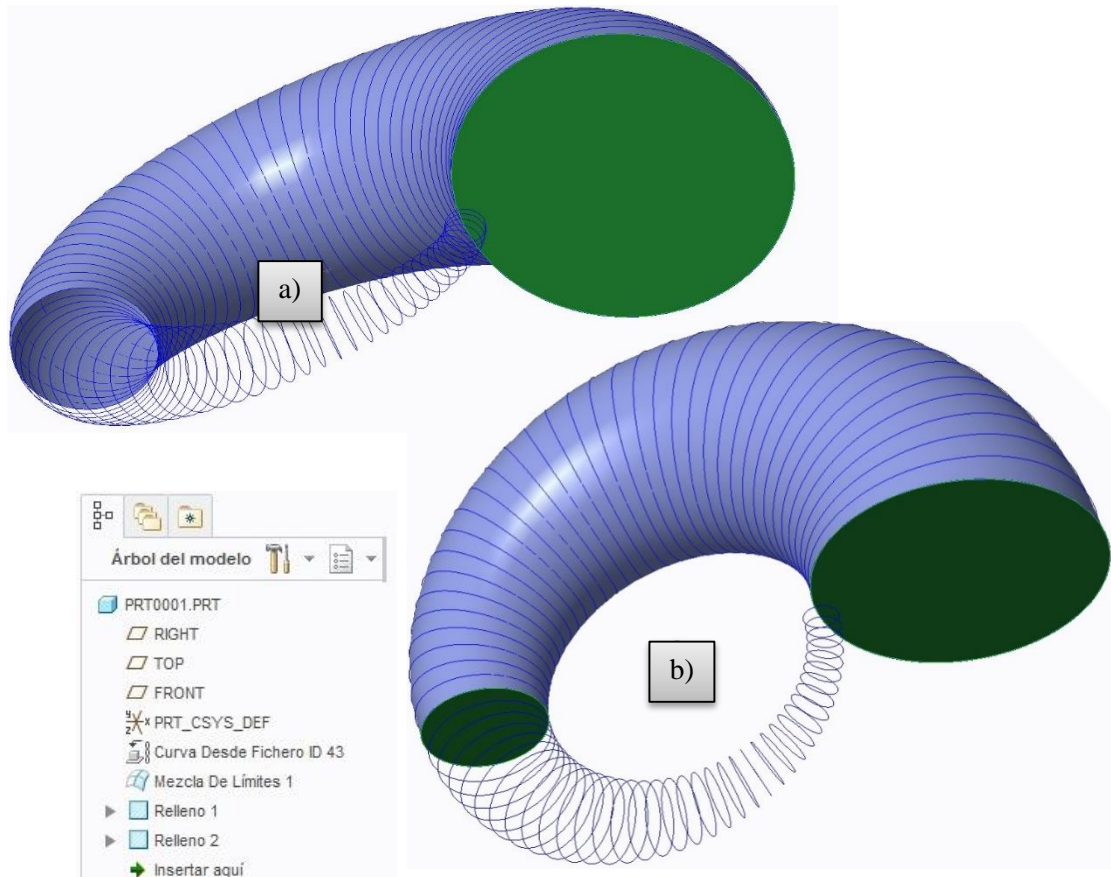


Fig. 13. a) Relleno tapa 1, b) rellenos tapa dos y procesos.

Teniendo los dos rellenos procedemos a combinar las partes, primero seleccionamos la mezcla de límites 1 y el relleno 1 que se encuentra en el árbol de modelado, damos clic en combinar y se visualiza la geometría como si estuviera mallada (discretizado) las partes del modelo seleccionados, véase Fig. 14a, Procedemos a realizar la segunda combinación seleccionando el relleno 2 y la combinación 1, véase Fig. 14b

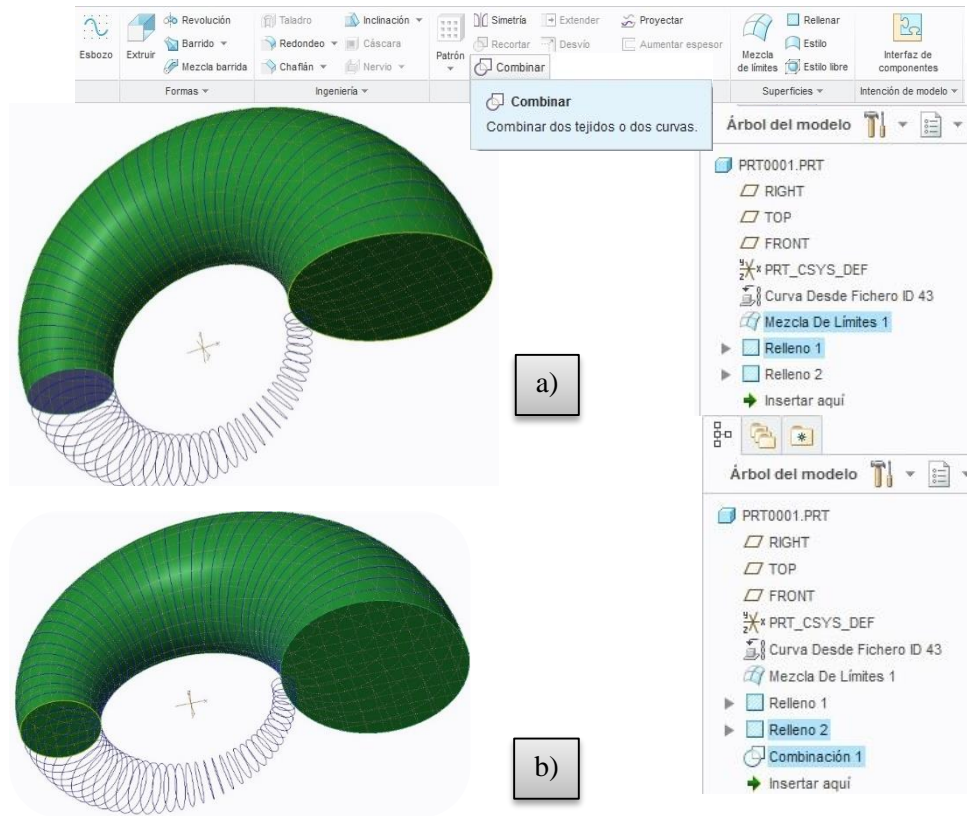


Fig. 14a. Combinación 1, b) Combinación 2.

Con las dos combinaciones terminadas, podemos solidificar esta geometría pero se recomienda hacer las solidificaciones al final. Seleccionamos las últimas cuatro (4) operaciones realizadas anteriormente, *click* derecho ocultar y realizamos nuevamente dichas operaciones con la parte del esqueleto de la cámara en espiral que hace falta, véase Fig. 15.

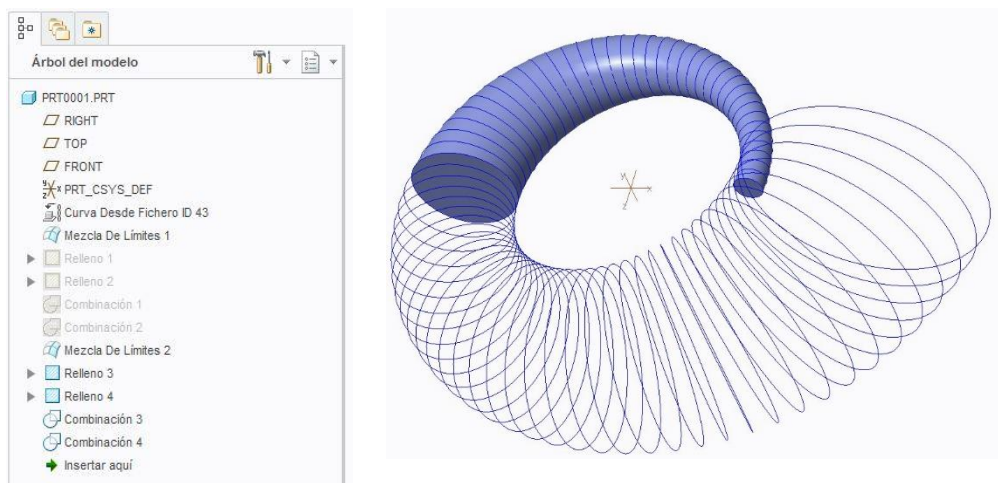


Fig. 15. Operaciones de modelado para la segunda sección de la cámara en espiral.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Revelamos nuevamente las operaciones antes ocultas y procedemos a solidificar las combinaciones dos (2) y cuatro (4) véase Fig. 16a, 16b, para tener un cuerpo solido del total de la cámara en espiral véase Fig. 16c, el cual podemos incluir operaciones de modelado de sólidos.

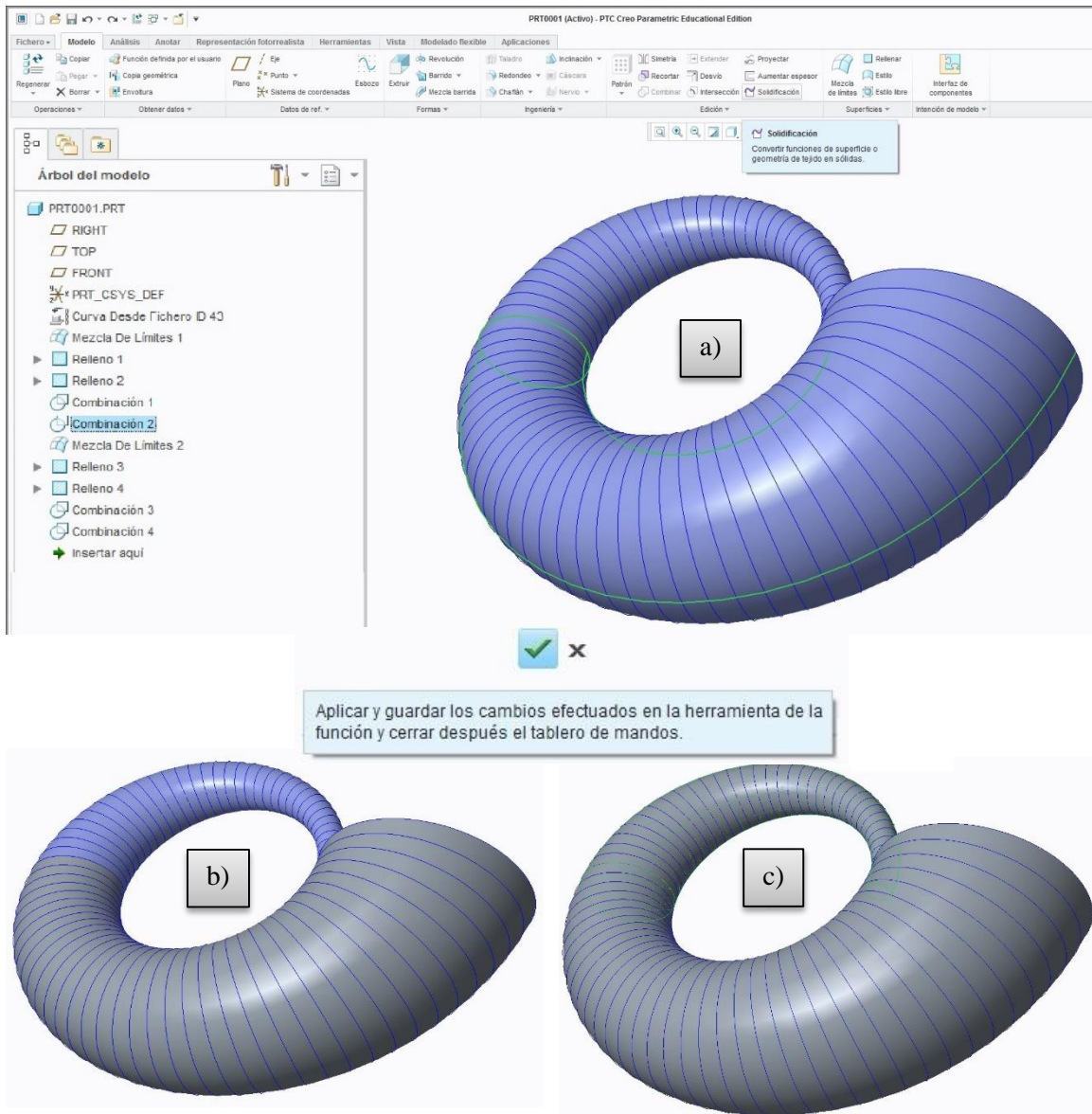


Fig. 16. a) selección combinación 2, b) solidificación de la combinación 3, c) solidificación del total de la geometría.

Generamos una extrusión en la sección transversal con mayor diámetro, esta será la entrada de la cámara en espiral, lo realizamos por medio de un boceto el cual dibujamos el diámetro de dicha sección o lo proyectamos por medio de bucle y la longitud de extrusión es de 200 mm dato que permanece constante para todas las cámaras en espiral, véase Fig. 17.

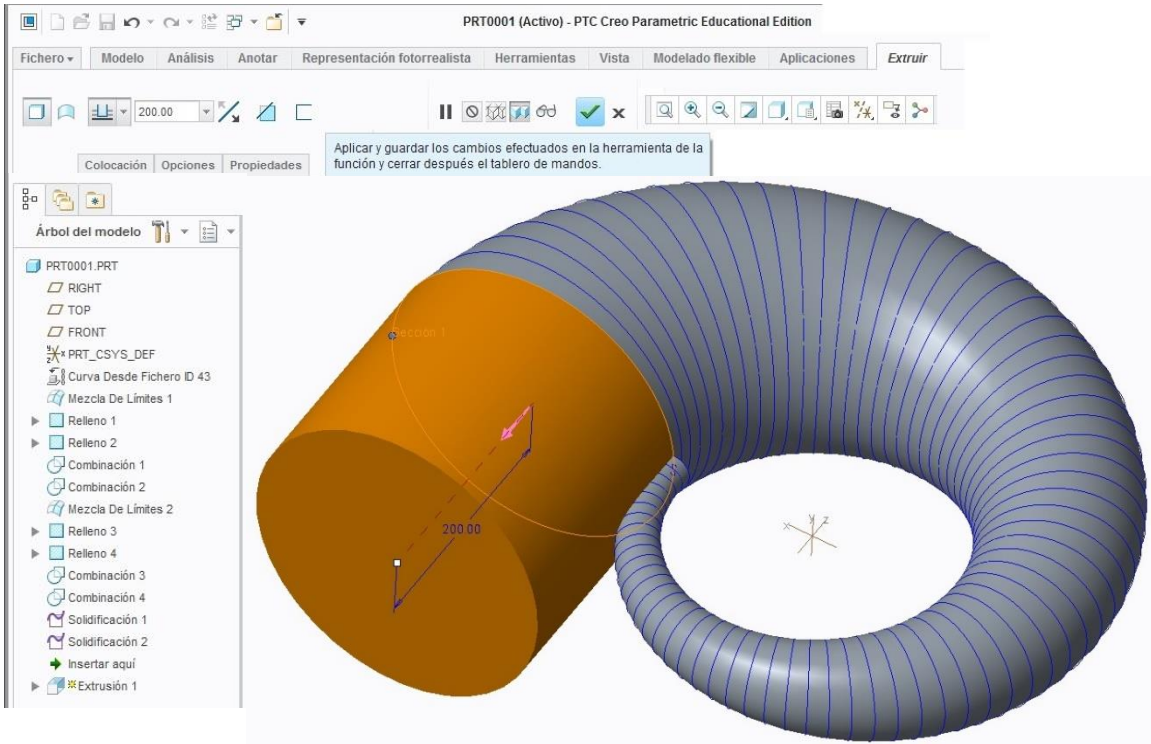


Fig. 17. Extrusión de la entrada de la cámara en espiral.

Para completar la geometría del fluido del agua que pasa por medio de una cámara en espiral necesitamos generar la salida, para esto realizamos nuevamente una extrusión en este caso en el radio interno, realizamos el boceto en el plano que nos permita dibujar dos centros cada uno con un diámetro de 250 y 200 mm, se recomienda hacerlo por centro y punto, por el cual toma el centro de los ejes coordenados que al inicio importo el esqueleto de la cámara en espiral, véase Fig. 18a, realizamos la extrusión sobre amos lado del plano de esbozo utilizando el valor de profundidad especificado en cada dirección, dicho valor es de 30 mm, véase Fig. 18b.

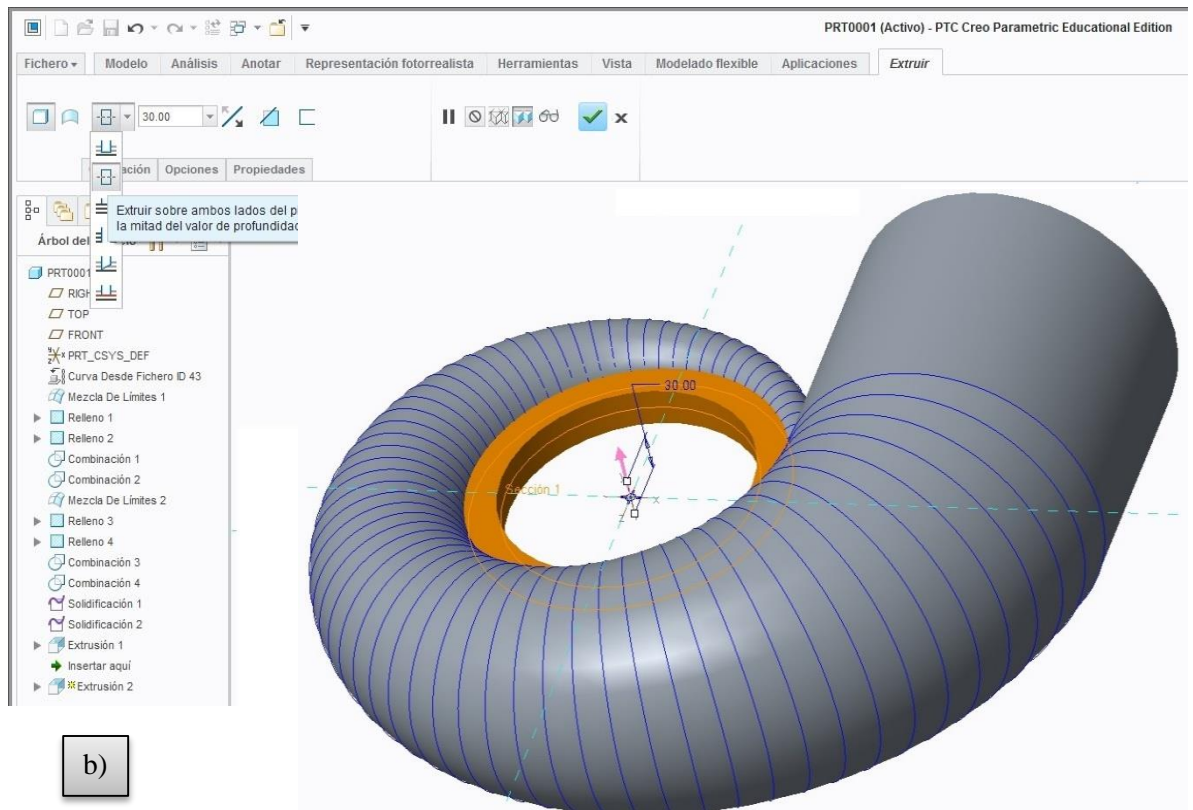
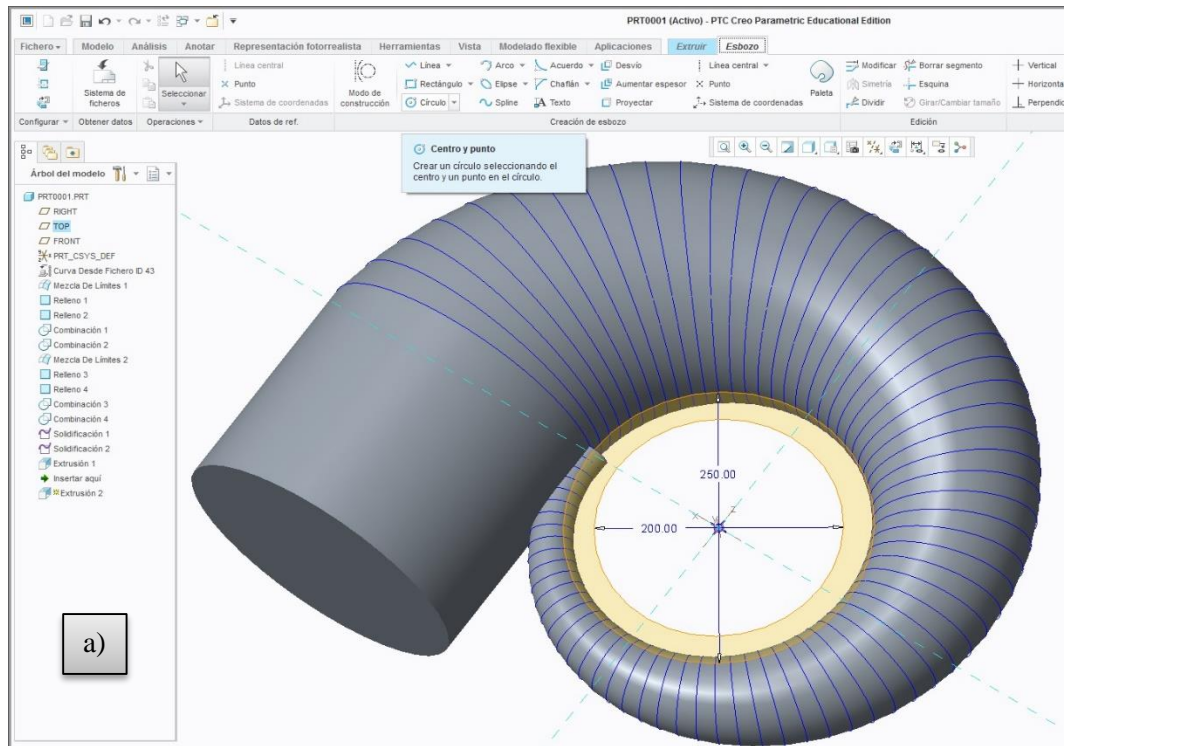


Fig. 18 a) Boceto de la salida, b) Extrusión se la salida del fluido.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Con esta última extrusión terminamos los procedimientos adecuados por medio de modelado avanzado para diseñar la geometría de forma precisa de la cámara en espiral, para la exportación de esta geometría, ingresamos al fichero ubicado en la barra de herramientas y damos *click* en guardar como, seleccionamos la opción sólidos y como formato IGES el cual es un formato que la gran mayoría de los programas CAD, CAE, CAM lo reconocen, véase Fig. 19.

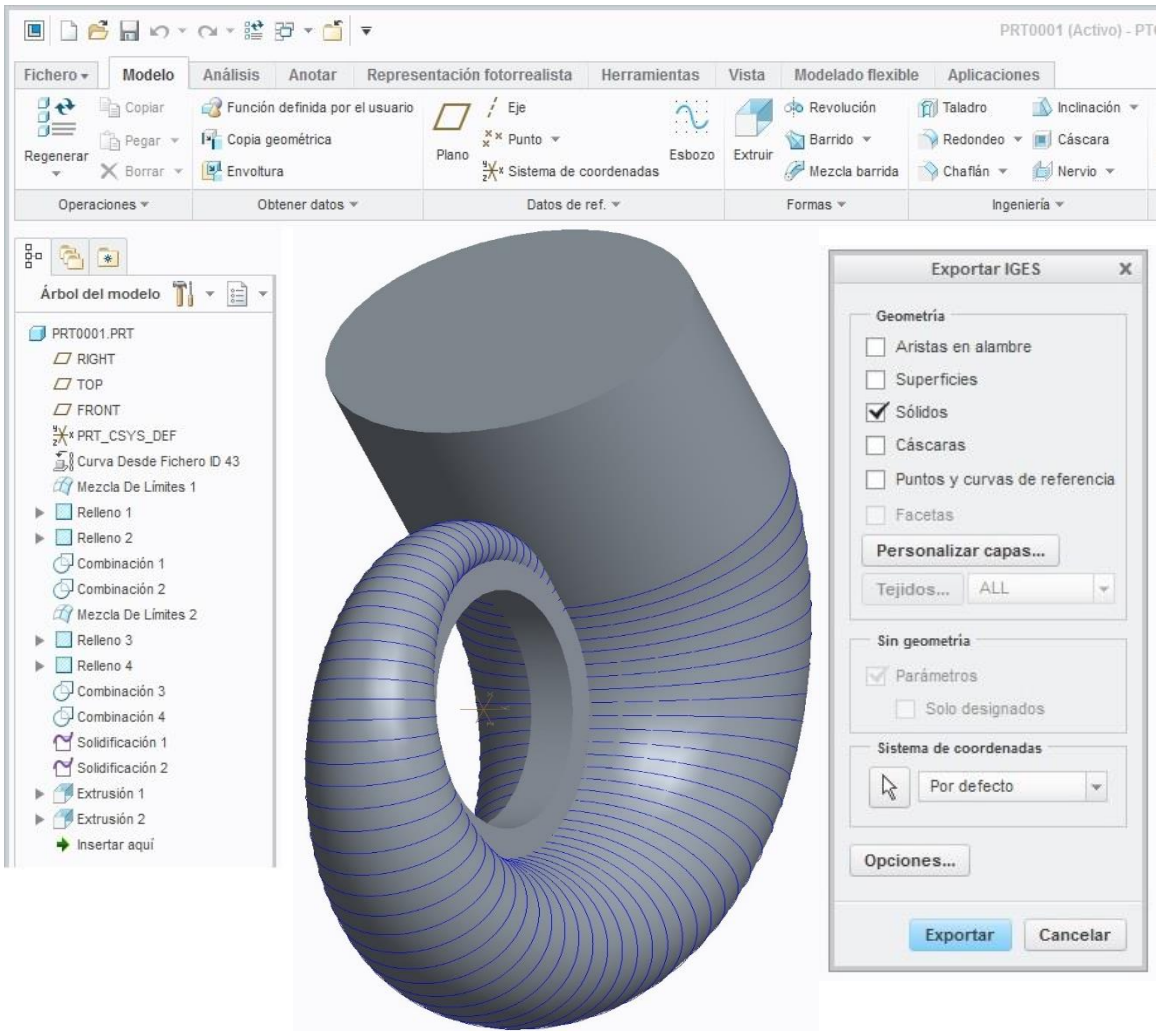


Fig. 19. Exportación de la geometría del fluido de una cámara en espiral.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó con satisfacción la parametrización de todas las trayectorias de las ecuaciones características de espirales y la creación de la sección transversal con base a las trayectorias de coordenadas polares a cartesianas para su fácil compresión en las rutinas de programación.

Las curvas de figuras matemáticas complejas en coordenadas polares puede parametrizarse de manera sencilla, pero teniendo en cuenta los valores de las constantes de proporcionalidad y compensación como limitación a realizar métodos geométricos.

Se generó 7 códigos de Matlab® uno por cada espiral y en cada uno se puede variar los parámetros de entrada en espiral el cual genera una cámara distinta.

se podría acoplar el código por medio de una GUI (interfaz gráfica de usuario) el cual contemple todos los códigos en uno solo y con ingresar la ecuación característica y el diámetro de entrada de espiral, automáticamente genere los puntos espaciales y los exporte en un archivo .ibl

En la Fig. 20 es posible observar la metodología implementada para el modelamiento de la cámara en espiral, se generan puntos espaciales por medio de rutinas de Matlab® estos puntos son llevados a un programa de modelado como creo parametric. 2.0, véase Fig. 20a, luego se generan superficies que recorren todas las secciones transversales, véase Fig. 20b, después se rellenan el primero y el último aro, para combinar y solidificar, véase Fig. 20c y por último se realizan extrusiones de la entrada y salida de la espiral, véase Fig. 20d.

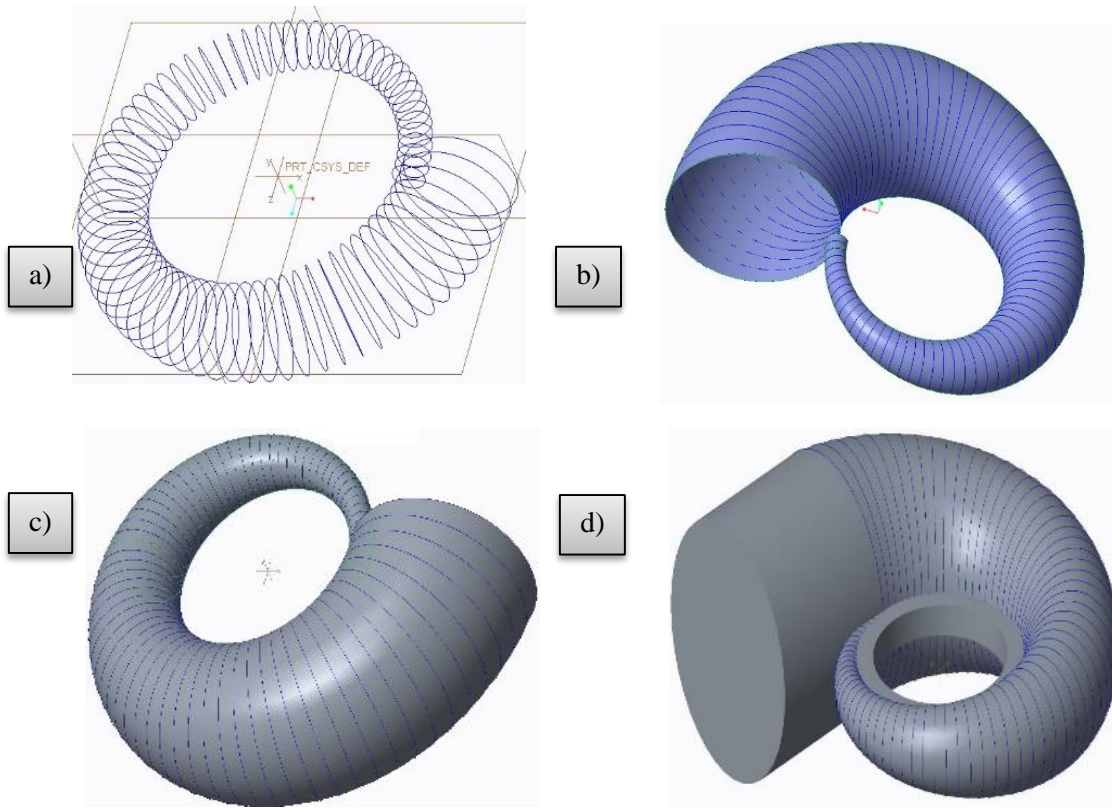


Fig. 20. Metodología para el diseño de espirales. a) importación de puntos espaciales, b) generación de superficies siguiendo las secciones transversales, c) Geometría de la cámara solidificada, c) Cámara en espiral con entrada y salida.

La generación de superficies por medio de las secciones transversales no se realizó de manera continua es decir seleccionando los 72 aros porque al momento de combinar los tejidos y los rellenos aparece un error de intercepción, véase Fig. 21.

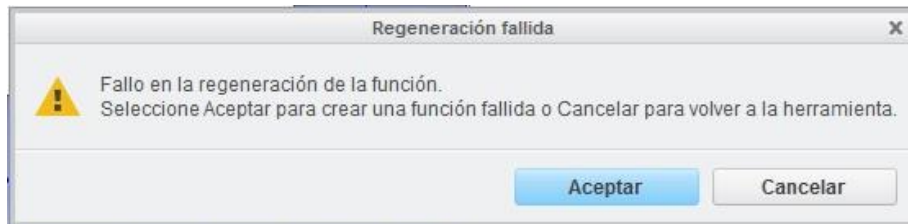


Fig. 21. Error generado por traslapar los rellenos.

Otra limitación en la metodología de modelado es realizar la generación de superficies por medio de estilo (crea superficies de forma libre) por no tener un grado matemático de acople tan eficiente como si lo es la mezcla de límites, véase Fig. 22.

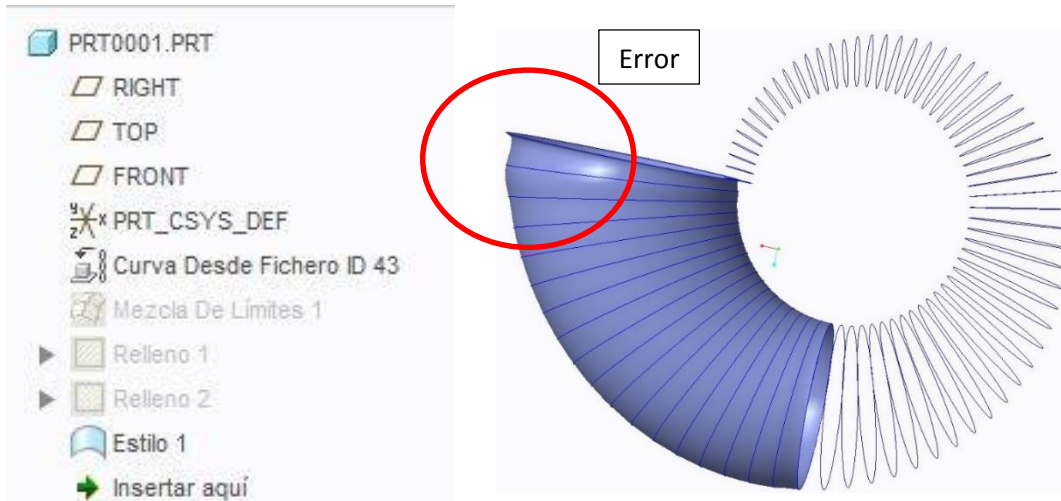


Fig. 22. Formación precaria de las superficies iniciales por el método de estilo.

La fiabilidad de la cámara en espiral es directamente proporcional al número de secciones transversales que se utilicen para realizar el CAD, hasta llegar a un punto donde tener demasiadas secciones no sumara fiabilidad, para llegar a esto, se realizó la siguiente metodología:

1. Generar cámaras en espiral con diferentes secciones transversales con la metodología implementada en este trabajo, por ejemplo 7 secciones transversales, véase Fig. 22.

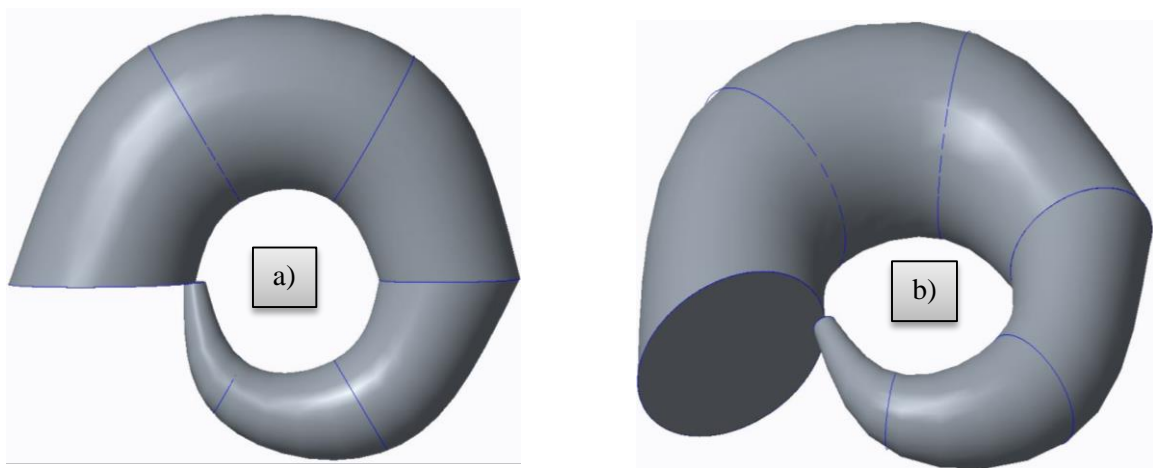


Fig. 22. Modelo de fidelidad con 7 secciones transversales. a) vista superior, b) vista isométrica.

- Continuamos con cortes longitudinales a la cámara de 7 (color gris) y 72 (color café) secciones transversales para llevar estos cortes a un plano 2D y poder realizar una resta de imágenes, véase Fig. 23.

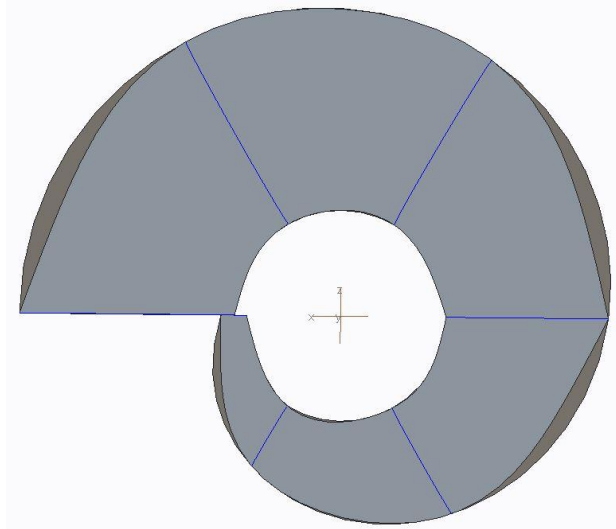


Fig. 23. Comparación de cortes longitudinales de cámaras en espiral.

- En la Fig. 24 se puede observar el resultado de la resta de imágenes, gracias a la herramienta medir área que se encuentra en la tabla de herramientas de Creo Parametric 3.0, podremos cuantificar el área que falta para completar una cámara en espiral de alta fiabilidad.



Fig. 24. Resta de imágenes de cámaras en espiral.

4. Por último se normaliza este valor con respecto al área de mayor error y se repite los pasos anteriores con 11 geometrías aumentando proporcionalmente secciones transversales para tener una perspectiva de fiabilidad con respecto a dichas secciones, véase Fig. 25.

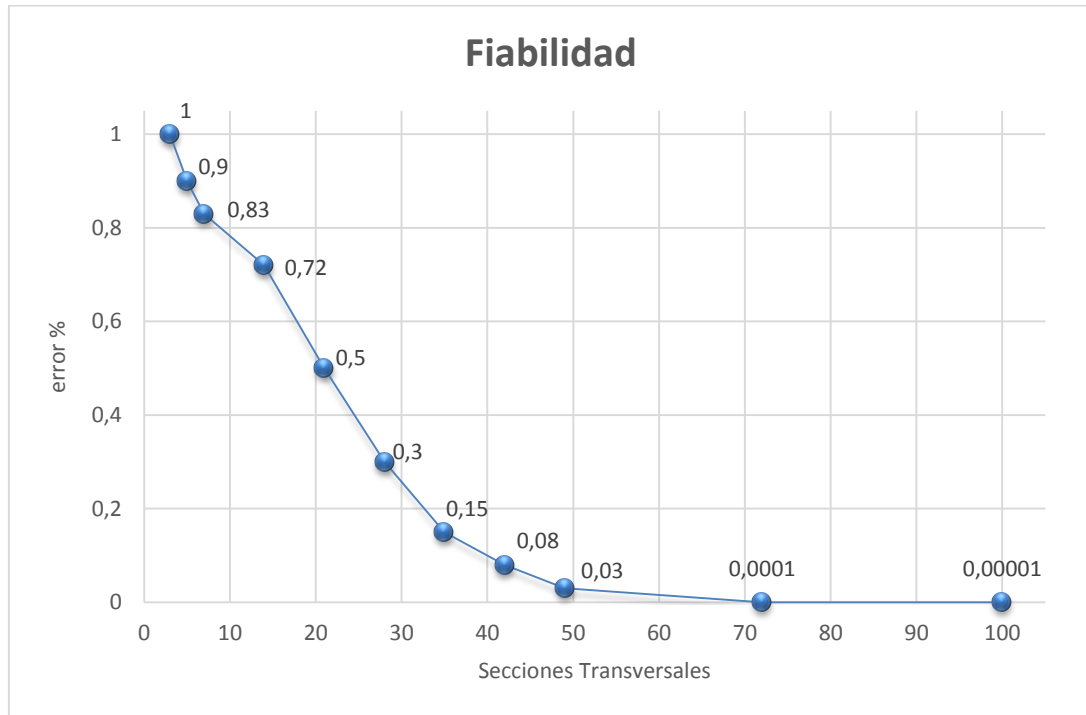


Fig. 25. Resultados de fiabilidad.

Como anexo al trabajo está el banco de las geometrías, 5 por cada espiral variando el diámetro de entrada, a estas las llamaremos geometrías de la familia característica como se puede observar en la tabla 3.

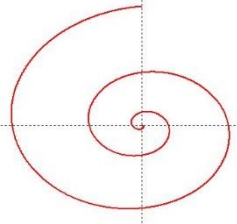
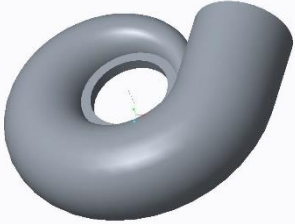
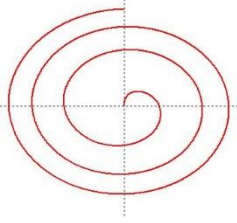

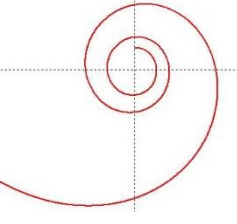
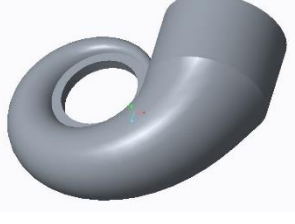
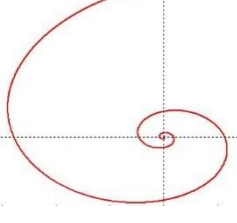

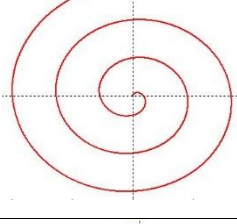
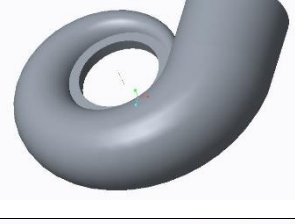
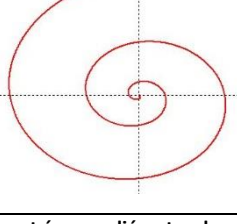
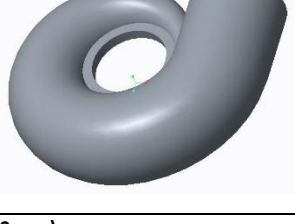
Espiral	Trayectoria 2D	Geometría 3D
Galileo		
Fermat		
Hiperbólica		
Logarítmica		
Arquímedes		
Polinómica		

Tabla 3. Banco de geometrías con diámetro de entrada igual (250 mm).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Se logró Desarrollar una metodología parametrizando ecuaciones características de espirales para identificar y establecer rutinas en Matlab® que nos generan puntos espaciales de un esqueleto de la cámara en espiral con base a ecuaciones características como la de Fermat, logarítmica, Arquímedes, galileo, hiperbólica y polinómica e importando dichos puntos a un programa CAD en este caso Creo Parametric 3.0, el cual por medio de procedimientos adecuados de modelado avanzado se diseñó la geometría de forma precisa con 72 secciones transversales las cuales nos dan una fiabilidad del 99.9999% de la cámara en espiral, de las turbinas hidráulicas de reacción, se obtuvo un banco de geometrías para su posterior investigación fluido dinámica y así evaluar su eficiencia hidráulica.

Como trabajo futuro se tiene la metodología para el modelamiento de geometrías complejas que necesiten desarrollar paramétricamente superficies ya que los programas CADD existentes no permiten desarrollar estas superficies, como por ejemplo un cangilón Pelton con base a la curva cardioide.

Con el banco de geometrías proporcionado por este trabajo, se proyecta realizar un estudio fluido dinámico variando cotas de entrada del fluido de las cámaras y así evaluar su eficiencia hidráulica y tener un criterio cuantitativo de seleccionar la mejor cámara en espiral para un futuro prototipo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

REFERENCIAS

- Agudelo, G. D. V. (2012, May 23). Límites al crecimiento de la empresa en Colombia: Un análisis neoinstitucional al sector de la generación eléctrica. *AD-Minister*. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/administer/article/view/647>
- Athanassiadis, N. (1990). *Potential Flow through Spiral Casings*.
- Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1067–1073. doi:10.1016/j.rser.2008.08.004
- Blanco, C. J. C., Secretan, Y., & Mesquita, A. L. A. (2008). Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. *Energy for Sustainable Development*, 12(3), 25–33. doi:10.1016/S0973-0826(08)60435-4
- Drinkwaard, W., Kirkels, A., & Romijn, H. (2010). A learning-based approach to understanding success in rural electrification: Insights from Micro Hydro projects in Bolivia. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 232–237. doi:10.1016/j.esd.2010.07.006
- Faeitch2012. (n.d.). camara espiral. Retrieved from <https://faeitch2012.files.wordpress.com/2012/02/camara-espiral3.jpg>
- Ion, C. P., & Marinescu, C. (2011). Autonomous micro hydro power plant with induction generator. *Renewable Energy*, 36(8), 2259–2267. doi:10.1016/j.renene.2011.01.028
- López S, R. A. (2003). *DISEÑO DE CAJAS ESPIRALES DE SECCIÓN CIRCULAR PARA TURBINAS HIDRÁULICAS NORMALIZADAS*. Universidad Central de Venezuela. Retrieved from [http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/506/1/Tesis de grado \(Ricardo Lopez\).pdf](http://saber.ucv.ve/jspui/bitstream/123456789/506/1/Tesis%20de%20grado%20(Ricardo%20Lopez).pdf)
- Márquez, J. L., Molina, M. G., & Pacas, J. M. (2010). Dynamic modeling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11), 5772–5777. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.02.100
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y maquinas hidraulicas*. Ediciones del castillo, S.A.
- Nouni, M. R., Mullick, S. C., & Kandpal, T. C. (2006). Techno-economics of micro-hydro projects for decentralized power supply in India. *Energy Policy*, 34(10), 1161–1174. doi:10.1016/j.enpol.2004.10.016
- ONU. (2000). Declaración del milenio. *Africa*, 17852, 1–17. Retrieved from http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

Pineda, L., Scheel, C., & Gipe. (2011). Plan de Ciencia y Tecnología e innovación de la ciudad de Medellín. *Ruta-N*, 96. Retrieved from http://www.rutanmedellin.org/images/programas/plan_cti/Documentos/Plan-de-CTi-de-Medellin.pdf

Upme. (2009). Energía Hidraulica. Retrieved February 3, 2015, from <http://www.si3ea.gov.co/Home/Energ%C3%ADaHidraulica/tabid/77/language/en-US/Default.aspx>

Yassi, Y., & hashemloo, S. (2010). Improvement of the efficiency of the Agnew micro hydro turbine at part loads due to installing guide vanes mechanism. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1970–1975. doi:10.1016/j.enconman.2010.02.029

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

APÉNDICE

Rutinas de Matlab®

- Espiral Fermat

```

clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
trayectoria=0;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
ombe=radiointerior+(radioexterior/2);
radiodeentradaespiral=ombe+((10*sqrt(365))/73);
%radio interior mas radio de tubo de entrada+c
k=radiodeentradaespiral;
c=(radiointerior-k)/((365)^0.5);
I=30;

%radiosecciontransversal=0
%valor de la constante c -2.617119613

fileID = fopen('C:\Fermat250.ibl','w');
fclose(fileID);
fileID = fopen('C:\Fermat250.ibl','a');
fprintf(fileID,'open\n');
fprintf(fileID,'arclength\n');

for theta=5:deltatheta:365
    theta;
    radioespiral=(c*(theta)^0.5)+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID,'begin section !%-5.0f\n',trayectoria);
    fprintf(fileID,'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

    for phi=0:deltaphi:360

        x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd((theta-5));
        y=radiosecciontransversal*sind(phi);
        z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind((theta-5));

        T(contador,1)=trayectoria;
        T(contador,2)=posicion;
        T(contador,3)=x;

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```

T(contador,4)=y;
T(contador,5)=z;
R(contador,1)=radioespiral;
Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',posicion);
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',x);
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',y);
fprintf(fileID,'% -10.3f\n',z);
contador=contador+1;
posicion=posicion+1;

```

end

```
trayectoria=trayectoria+1;
```

end

```
fclose(fileID);
```

- Espiral Galileo

```

clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
trayectoria=1;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
radiodeentradaespiral=radiointerior+(radioexterior/2);
k=radiodeentradaespiral;

c=(radiointerior-k)/((360)^2);
I=30;

fileID = fopen('C:\Galileo250.ibl','w');
fclose(fileID);
fclose('all');
fileID = fopen('C:\Galileo250.ibl','a');
fprintf(fileID,'open\n');
fprintf(fileID,'arclength\n');

for theta=0:deltatheta:360
    theta;
    radioespiral=(c*(theta^2))+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID,'begin section !%-5.0f\n',trayectoria);
    fprintf(fileID,'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```
for phi=0:deltaphi:360
```

```

x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd(theta);
y=radiosecciontransversal*sind(phi);
z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind(theta);

```

```

T(contador,1)=trayectoria;
T(contador,2)=posicion;
T(contador,3)=x;
T(contador,4)=y;
T(contador,5)=z;
R(contador,1)=radioespiral;
Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;
fprintf(fileID, '%-10.3f\t', posicion);
fprintf(fileID, '%-10.3f\t', x);
fprintf(fileID, '%-10.3f\t', y);
fprintf(fileID, '%-10.3f\n', z);

```

```

contador=contador+1;
posicion=posicion+1;

```

```
end
```

```
trayectoria=trayectoria+1;
```

```
end
```

- Espiral Pólinomica

```

clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
trayectoria=0;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
radiodeentradaespiral=radiointerior+(radioexterior/2);
k=radiodeentradaespiral;
%Rc(theta)=(C2*(theta)^2)+C1*(theta)+k----- resolvemos el valor de las
%constantes por ecuaciones diferenciales, metodo de valores en la
frontera.
%Rc(theta)-k=(C3*(theta)^3)+(C2*(theta)^2)+C1*(theta) se deriva
respecto a tetha
%0=3(C3*(theta)^2)+2(C2*(theta))+C1 nuestro valor de frontera theta(0)=0
%se deriva otra vez y se hallan C2 y C3 reemplazando estos valores con la
ecuacion
%inicial se halla C3
C3=(radiointerior-k)/360^3;
C2=0;

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```
C1=0;
I=30;
```

```
fileID = fopen('C:\Polinomica250.ibl', 'w');
fclose(fileID);
fileID = fopen('C:\Polinomica250.ibl', 'a');
fprintf(fileID, 'open\n');
fprintf(fileID, 'arclength\n');

for theta=0:deltatheta:360
    theta;
    radioespiral=(C3*(theta)^3)+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID, 'begin section !%-5.0f\n', trayectoria);
    fprintf(fileID, 'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

    for phi=0:deltaphi:360

        x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd((theta));
        y=radiosecciontransversal*sind(phi);
        z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind((theta));

        T(contador,1)=trayectoria;
        T(contador,2)=posicion;
        T(contador,3)=x;
        T(contador,4)=y;
        T(contador,5)=z;
        R(contador,1)=radioespiral;
        Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', posicion);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', x);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', y);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\n', z);
        contador=contador+1;
        posicion=posicion+1;

    end

    trayectoria=trayectoria+1;

end
fclose(fileID);
```

- **Espiral Hiperbólica**

```
clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```

trayectoria=1;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
radiodeentradaespiral=radiointerior+(radioexterior/2);
k=radiodeentradaespiral;

c=(radiointerior-k)*360;
I=30;

fileID = fopen('C:\Hiperbolica250.ibl', 'w');
fclose(fileID);
fclose('all');
fileID = fopen('C:\Hiperbolica250.ibl', 'a');
fprintf(fileID, 'open\n');
fprintf(fileID, 'arclength\n');

for theta=0:deltatheta:360
    theta;
    radioespiral=(c/theta)+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID, 'begin section !%-5.0f\n', trayectoria);
    fprintf(fileID, 'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

    for phi=0:deltaphi:360

        x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd(theta);
        y=radiosecciontransversal*sind(phi);
        z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind(theta);

        T(contador,1)=trayectoria;
        T(contador,2)=posicion;
        T(contador,3)=x;
        T(contador,4)=y;
        T(contador,5)=z;
        R(contador,1)=radioespiral;
        Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', posicion);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', x);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\t', y);
        fprintf(fileID, '%-10.3f\n', z);

        contador=contador+1;
        posicion=posicion+1;
    end

    trayectoria=trayectoria+1;

end

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

- Espiral de Arquímedes

```

clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
trayectoria=1;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
radiodeentradaespiral=radiointerior+(radioexterior/2);
k=radiodeentradaespiral;

c=(radiointerior-k)/360;
I=30;

fileID = fopen('C:\Arquímedes250.ibl','w');
fclose(fileID);
fclose('all');
fileID = fopen('C:\Arquímedes250.ibl','a');
fprintf(fileID,'open\n');
fprintf(fileID,'arclength\n');

for theta=0:deltatheta:360
    theta;
    radioespiral=(c*theta)+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID,'begin section !%-5.0f\n',trayectoria);
    fprintf(fileID,'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

    for phi=0:deltaphi:360

        x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd(theta);
        y=radiosecciontransversal*sind(phi);
        z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind(theta);

        T(contador,1)=trayectoria;
        T(contador,2)=posicion;
        T(contador,3)=x;
        T(contador,4)=y;
        T(contador,5)=z;
        R(contador,1)=radioespiral;
        Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;
        fprintf(fileID,'%-10.3f\t',posicion);
        fprintf(fileID,'%-10.3f\t',x);
        fprintf(fileID,'%-10.3f\t',y);
        fprintf(fileID,'%-10.3f\n',z);
    end
end

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```

    contador=contador+1;
    posicion=posicion+1;
end

```

```

trayectoria=trayectoria+1;

```

```

end

```

- **Espiral Logaritmica**

```

clear
clc
close all
deltatheta=5;
deltaphi=5;
radioespiral=0;
trayectoria=1;

contador=1;
radiointerior=125;
radioexterior=250;
radiodeentradaespiral=radiointerior+(radioexterior/2);
k=radiodeentradaespiral;

c=(radiointerior-k)/exp(360);
I=30;

fileID = fopen('C:\Logaritmica250.ibl','w');
fclose(fileID);
fclose('all');
fileID = fopen('C:\Logaritmica250.ibl','a');
fprintf(fileID,'open\n');
fprintf(fileID,'arclength\n');

for theta=0:deltatheta:360
    theta;
    radioespiral=(c*exp(theta))+k;
    posicion=1;
    fprintf(fileID,'begin section !%-5.0f\n',trayectoria);
    fprintf(fileID,'begin curve\n');
    radiosecciontransversal=((I/2)^2+(radioespiral-radiointerior)^2)^0.5;

    for phi=0:deltaphi:360

        x=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*cosd(theta);
        y=radiosecciontransversal*sind(phi);
        z=(radioespiral+radiosecciontransversal*cosd(phi))*sind(theta);

        T(contador,1)=trayectoria;
        T(contador,2)=posicion;
        T(contador,3)=x;
        T(contador,4)=y;
    end
end

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

```
T(contador,5)=z;  
R(contador,1)=radioespiral;  
Rt(contador,1)=radiosecciontransversal;  
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',posicion);  
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',x);  
fprintf(fileID,'% -10.3f\t',y);  
fprintf(fileID,'% -10.3f\n',z);  
  
contador=contador+1;  
posicion=posicion+1;  
end  
  
trayectoria=trayectoria+1;  
  
end
```


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2013-09-16

FIRMA ESTUDIANTES Jonathan Guerra

FIRMA ASESOR Diego A Hincapié

FECHA ENTREGA: 12/11/15

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____