

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

OPTIMIZACIÓN DE UN ASPERSOR DE AGUA PARTIENDO DESDE LA INGENIERÍA INVERSA

Autores

Nelson Enrique Bran Urrego

Jennifer Astrid Pérez Gutiérrez

Emerzón Aldrúal Piedrahíta Henao

Programa Académico

Ingeniería Electromecánica

Director(es) del trabajo de grado

Jorge Andrés Sierra del Río

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

19 de agosto 2016

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El proyecto *Optimización de un aspersor de agua partiendo desde la ingeniería inversa* es un estudio de Ingeniería Asistida por Computador (CAE por sus siglas en inglés), que parte de la ingeniería inversa para hacer un análisis en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), realizado a través del software especializado Ansys Workbench v. 16.2 mediante el módulo CFX, que permite obtener la simulación del fluido de trabajo en una boquilla de cono hueco comercial existente.

Este trabajo tiene por objeto hacer un prospecto de reingeniería que permita llegar a la optimización de una boquilla de cono hueco comercial existente, para lograr esto, el desarrollo de la metodología se divide en 5 fases:

- Fase I-Digitalización: proceso de digitalización 3D utilizando el escáner Artec Spider®.
- Fase II-Simulación computacional: simulación en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el programa ANSYS Workbench® V16.2 para obtener el comportamiento virtual del flujo de agua.
- Fase III-Optimización: Con el modelo computacional validado se prueban numéricamente diferentes geometrías para el aspersor.
- Fase IV-Experimentación: Validación experimental de los resultados obtenidos mediante la simulación computacional.
- Fase V-Fabricación: fabricación del modelo que presente mejor comportamiento en la fase IV y comparación numérico-experimental final entre el modelo optimizado y el modelo existente.

En conclusión, el proyecto valida experimentalmente un modelo optimizado basado en técnicas de Ingeniería Asistida por Computador (CAE), que permiten simular el funcionamiento y rendimiento de una boquilla de cono hueco para la aspersión de líquidos.

Palabras clave: Ingeniería inversa, boquilla de cono hueco, Ansys, Artec Spider, CAD, CAE, CFD, ITM, lavador de gases, optimización.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico Metropolitano por ofrecer la guía para el desarrollo de nuestro proyecto de vida.

A la línea de Computación Avanzada y Diseño Digital perteneciente al grupo de Investigación de Materiales Avanzados y Energía MATyER-CADD por su apoyo a nuestro trabajo.

Al profesor Jorge Andrés Sierra del Río por el aporte de su experiencia a la realización de este estudio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

CAD Diseño Asistido por Computador (Computer Aided Design)

CAE Computer - Aided Engineering (Ingeniería Asistida por Computador)

CFD Computational Fluid Dynamic (Dinámica de Fluidos Computacional)

ITM Instituto Tecnológico Metropolitano

MATyER-CADD Grupo de investigación en Materiales Avanzados y Energía con énfasis en la Computación Avanzada y Diseño Digital

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
Generalidades.....	8
Objetivos.....	10
General	10
Específicos.....	10
Organización de la tesis	11
1. ESTADO DEL ARTE	12
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 La ingeniería inversa	16
2.2 Uso del escáner 3D en los procesos de ingeniería inversa.....	17
2.3 Diseño Asistido por Computador - CAD (Computer Aided Design)	19
2.4 Boquillas de cono hueco.....	20
2.5 Ansys.....	23
2.6 Computational Fluid Dynamics - CFD	24
3. METODOLOGÍA	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
Fase I-Digitalización	28
Fase II-Simulación computacional	28
Fase III-Experimentación	29
Fase IV-Optimización	49
Fase V-Fabricación.....	50
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	58
REFERENCIAS	60
APÉNDICE.....	63
APÉNDICE A: Ficha técnica boquilla BETE WT	63
Especificaciones de la boquilla inicial	65
APÉNDICE B: Códigos para realizar la boquilla en la máquina	67

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. BOQUILLAS DE ASPERSIÓN DE CONO HUECO (ACONDINSA, 2015)	20
FIGURA 2. BOQUILLAS DE ASPERSIÓN DE CONO LLENO (ACODINSA, 2015)	21
FIGURA 4. BOQUILLAS DE NIEBLA (ACODINSA, 2015)	21
FIGURA 5. BOQUILLAS OPERADAS CON AIRE COMPRIMIDO (ACODINSA, 2015)	22
FIGURA 6. FUNCIONAMIENTO BOQUILLA DE CONO HUECO. (NONNENMACHER & PIESCHE, 2000)	23
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL ASPERSOR REQUERIDO. (ELABORACIÓN PROPIA)	27
FIGURA 8. BOQUILLA INICIAL BETE WT 40080 (FUENTE PROPIA)	28
FIGURA 9. MODELO CAD BOQUILLA WT 40080: DISTRIBUIDOR - ENSAMBLE - LÍNEAS INTERIORES	28
FIGURA 10. SIMULACIÓN A 80° COMPORTAMIENTO DE LA BOQUILLA INICIAL	29
FIGURA 11. SIMULACIÓN A 120° COMPORTAMIENTO DE LA BOQUILLA OPTIMIZADA	29
FIGURA 12. MÓDULO DEL LABORATORIO DE FLUIDOS (FUENTE ITM).....	31
FIGURA 13. TANQUE 1 ACRÍLICO	31
FIGURA 14. DATOS DEL FUNCIONAMIENTO EXPERIMENTAL DE BOQUILLA BETE WT 400 80 VS CATÁLOGO DEL FABRICANTE (FUENTE PROPIA Y CATÁLOGO BETE)	35
FIGURA 15. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA ORIGINAL A 10 PSI.....	36
FIGURA 16. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA ORIGINAL A 30 PSI.....	36
FIGURA 17. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA OPTIMIZADA A 10 PSI.....	37
FIGURA 18. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA OPTIMIZADA A 30 PSI.....	37
FIGURA 19. ÁNGULO DE APERTURA A 10 PSI BOQUILLA WT 40080	38
FIGURA 20. ÁNGULO DE APERTURA A 30 PSI BOQUILLA WT 40080	38
FIGURA 21. ÁNGULO DE APERTURA A 10 PSI BOQUILLA OPTIMIZADA.....	39
FIGURA 22. ÁNGULO DE APERTURA A 30 PSI BOQUILLA OPTIMIZADA.....	39
FIGURA 23. USO DE LA PLOMADA PARA CENTRAR LA BOQUILLA SOBRE EL CENTRO DE LA CIRCUNFERENCIA (FUENTE PROPIA)	40
FIGURA 24. UBICACIÓN DEL NIVEL DE GOTA.....	41
FIGURA 25. PRUEBAS DE DISTRIBUCIÓN BOQUILLA ORIGINAL	42
FIGURA 26. PRUEBA DE DISTRIBUCIÓN BOQUILLA OPTIMIZADA.....	42
FIGURA 27. PESAJE PARA LA BOQUILLA ORIGINAL.....	44
FIGURA 28. PESAJE BOQUILLA OPTIMIZADA	45
FIGURA 29. GEOMETRÍA DE BOQUILLA WT 400 80 MARCA BETE	49
FIGURA 30. GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA OPTIMIZADA.....	49
FIGURA 31. PLANOS ISOMÉTRICOS DEL DISTRIBUIDOR DE LA BOQUILLA.....	50
FIGURA 32. OPERACIONES, UTILAJES Y SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS	51
FIGURA 33. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN Y LA GENERACIÓN DE LOS CÓDIGOS	52
FIGURA 34. EJECUCIÓN DE LA BOQUILLA CON SU FORMA TERMINADA	53
FIGURA 35. BOQUILLA CON SU FORMA TERMINADA PARA UTILIZARLA.....	53

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TABLA PARA LA TOMA DE DATOS EXPERIMENTACIÓN BOQUILLAS, FUENTE PROPIA	34
TABLA 2. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA ORIGINAL A 10 PSI	36
TABLA 3 . PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA ORIGINAL A 30 PSI	36
TABLA 4. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA MEJORADA A 10 PSI	37
TABLA 5. PRUEBAS DE FLUJO BOQUILLA MEJORADA A 30 PSI	37
TABLA 6. VALIDACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN, SIMULACIÓN VS EXPERIMENTACIÓN	48
TABLA 7. RESULTADOS EXPERIMENTALES VS SIMULACIÓN FUENTE PROPIA	56

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INTRODUCCIÓN

Generalidades

Cada vez se hace más uso de la computadora para realizar innovaciones tecnológicas, debido a que resulta más confiable y exacto. Sin embargo, se debe reconocer que para muchos acceder a las herramientas tecnológicas de punta no siempre es posible, por los altos costos que involucra.

Es así como el Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM ha hecho una apuesta por la innovación, investigación y el servicio a la industria nacional, para ser reconocido por su aporte a los procesos de ingeniería asistida por computador (CAE = Computer- Aided Engineering), tema en el que se viene fortaleciendo desde hace varios años.

En la actualidad ITM cuenta con el centro de investigación “Parque i” que une el mundo universitario con el industrial por medio de un conjunto de laboratorios especializados, para el desarrollo de la competitividad, tanto en el acceso al conocimiento por parte de los estudiantes, como en la generación de respuestas para la industria de Medellín. Una de sus mayores apuestas la constituyen los procedimientos en CAE, que ha venido impulsando a través de los grupos de investigación que operan desde estos laboratorios dotados con la última tecnología (Cfr. Riascos, Hincapié y Ardila, 2015).

En este contexto, se ha constituido el grupo de investigación MATyER-CADD del ITM, adscrito a Colciencias en la Categoría A, que ha sido de gran apoyo para la realización de este proyecto, ya que ha ofrecido el conocimiento de sus docentes y la infraestructura instalada de sus laboratorios, dotados con herramientas que han sido facilitadas, como el escáner Artec Spider y el software especializado en simulación Ansys Workbench® V 16.2 que contiene los módulos Fluent® y CFX®, los cuales “son empleados con el fin de predecir el comportamiento de los sistemas que poseen como principio de funcionamiento la mecánica de fluidos” (Riascos, Hincapié, & Ardila, 2015, pág. 294).

El interés por el funcionamiento de las boquillas de cono hueco surge al identificar que cada vez son más utilizadas para diferentes usos en la industria y por tanto un estudio de sus características y la apertura a posibilidades de optimización pueden abrir puertas al ITM en el mundo empresarial que requiera para su funcionamiento hacer aspersiones de líquidos, en áreas como fumigación, ingeniería, agricultura, minería, entre otras.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La boquilla de referencia inicial utilizada para realizar las pruebas es de marca BETE WT 400 80, fabricada en Estados Unidos y distribuida en Medellín por la empresa Acodinsa S.A.S, su precio varía entre \$60.000 y \$300.000 de acuerdo al tamaño y material utilizado.

Estas boquillas, en su proceso de funcionamiento manejan un menor flujo y mejor distribución de agua porque hacen aspersion del líquido tan sólo en el exterior del perímetro, mientras que las boquillas de cono lleno contienen líquido en toda el área del spray, generando mayor gasto.

El trabajo se fundamenta en la simulación en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para la que es determinante la utilización del módulo CFX del software Ansys Workbench®V16.2, que permite probar y modificar diferentes variables geométricas de la boquilla escaneada (ángulos en orificio de salida, inclinación del orificio de entrada de agua en la boquilla con respecto al centro del orificio de salida, tamaño de la boquilla y de los orificios de entrada y de salida, etc.) y así ayudar a predecir de manera virtual el comportamiento esperado del fluido de acuerdo a diferentes modificaciones, para hacer una nueva versión con una aspersion de agua óptima, logrando mejores resultados con menor gasto de recursos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Objetivos

General

Optimizar un aspersor de agua tipo cono hueco mediante un proceso de ingeniería inversa.

Específicos

- Digitalizar una boquilla de cono hueco existente y obtener el modelo CAD.
- Realizar la simulación computacional del fluido (CFD) al interior del aspersor de cono hueco.
- Validar experimentalmente el modelo computacional obtenido del aspersor existente.
- Modelar otra geometría del aspersor de cono hueco variando parámetros geométricos por medio del programa ANSYS Workbench® V 16.2
- Fabricar la geometría del aspersor mejorado.
- Realizar pruebas experimentales de desempeño y consumo de agua en la geometría mejorada.

El perfil se encuentra muy concentrado en un punto y con puntos vacíos como muestra la imagen y debido a los resultados obtenidos en la simulación no se fabricó la boquilla.

Se digitalizo el aspersor correcto, y debido a la geometría se levantó fácilmente el plano, mediante Ansys e inventor, se modificaron variables geométricas para buscar un mejor comportamiento del fluido comparándola con la boquilla inicial y fabricar la boquilla mejorada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Organización de la tesis

El documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el primer capítulo aparece el estado del arte que destaca una breve reseña histórica que muestra los inicios de la ingeniería inversa (iniciando en la segunda guerra mundial) y que en la actualidad contamos con herramientas tecnológicas que nos ayudan a realizar ingeniería inversa de una manera más práctica como lo indica (Ojados González, 2010) con la utilización de escáner 3D para digitalizar los elementos y posteriormente analizarlos con herramientas CFD como lo demuestran (Parisi-Amón & Lynn Murphey, 2016) que mediante éstas optimizaron el funcionamiento de un sistema de duchado para una empresa de gimnasios bajando el consumo de agua de 2.5 GPM a 0.75 GPM, también (Lin Xia, 2016) por medio de simulación CFD encontraron la ubicación adecuada de una boquilla para enfriar el tiro de aire en una torre de refrigeración (condensador) y así mejoraron su desempeño; siendo estos apenas unos ejemplos de la utilidad de la ingeniería inversa y la importancia de los software CFD en el análisis del comportamiento de los fluidos.

El segundo capítulo corresponde al Marco teórico, que incluye una aproximación a las teorías que sustentan el proyecto, como son: la definición y alcances de la ingeniería inversa; el uso del escáner en los procesos de ingeniería inversa; los desarrollos del CAD (Diseño Asistido por Computador); uso y funcionamiento de las boquillas de cono hueco; características del Ansys; y funcionamiento de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).

En el tercer capítulo se explica la metodología utilizada para realizar la optimización de la boquilla, que comienza con la digitalización de la boquilla utilizando el scanner Artec Spider para obtener la imagen 3D y parámetros geométricos como curvaturas, radios y longitudes internas con gran precisión. Se continúa con el proceso de Simulación CFD por medio del programa Ansys Workbench® V16.2, utilizando el módulo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CFX. Luego se procede a realizar la fase experimental para una comparación posterior con los resultados obtenidos de la simulación CFD del aspersor. Se realizan pruebas con geometrías diferentes hasta llegar finalmente a desarrollar la fase de optimización, y la de Fabricación del modelo óptimo.

En el cuarto capítulo aparecen los resultados y discusión a la que llevan los datos obtenidos

El quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones para un trabajo de investigación futuro.

1. ESTADO DEL ARTE

La aspersión de líquidos es necesaria en diferentes áreas de la industria, como la agricultura, enfriamiento, uso de pesticidas, automovilismo, minería, etc. Ésta debe darse de diversas formas de acuerdo al caso, ya que existen variedad de boquillas con usos específicos, que van desde las de cono hueco, cono lleno, chorro plano, niebla, aire comprimido, etc. Al reconocer la utilidad que tienen los diferentes tipos de boquillas, se ha tomado la decisión de hacer un estudio de ingeniería inversa a una boquilla de cono hueco.

La ingeniería inversa, por su parte, constituye una revolución en el mundo de la ingeniería. Su comienzo se da desde la Segunda Guerra Mundial y consiste en tomar el camino contrario al que se toma al hacer procesos de ingeniería, ya que se comienza a hacer el estudio a partir del objeto terminado y no del diseño dibujado en un plano, motivo por el que son de gran ayuda las modernas ayudas tecnológicas, para lograr, a partir del objeto, determinar cuáles son los diseños originales.

Para este análisis se han retomado estudios que sobre los procedimientos de *ingeniería inversa* han realizado otros investigadores.

Tal es el caso de Ojados González (2010), ingeniera de la Universidad de Cartagena – España, investigadora del uso que se da al escáner 3D para generar procesos de ingeniería inversa. Informa cómo el escáner permite obtener el diseño CAD de objetos que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

por diversos motivos carecen de recreación digital, ya sea porque se encuentran obsoletos o porque son difíciles de conseguir en determinado país. Reconoce la necesidad de hacer uso del escáner para aportar a la innovación y rediseño de piezas de interés médico, histórico, artístico, arquitectónico, arqueológico, ingenieril, etc.

Gómez y García (2015) aportan información al uso del escáner para los procesos de ingeniería inversa al presentar el estudio “Desarrollo de guía para el procedimiento de escaneo con el escáner 3D Artec Spider®”. Trabajo de grado propuesto como requisito para graduarse como tecnólogos electromecánicos en el ITM. Hacen un completo recorrido por la interface del mencionado escáner con el cual explican sus diferentes usos y presentan tres guías para su utilización en los procesos de ingeniería inversa.

Otro de los temas que han sido de interés para el desarrollo de este trabajo es la *simulación* en dinámica de fluidos computacional (CFD), uno de los mayores retos que presenta la ingeniería, pero ahora es posible realizarla, incluso antes de fabricar prototipos físicos, gracias a los métodos *CFD* de Ansys®. Aquí se han retomado los estudios de Parisi-Amón y Lynn Murphey (2016), Xia et al. (2016) y el de Bade, Kalata y Schick (2010).

Parisi-Amón y Lynn Murphey (2016) creativos de la empresa Nebia, buscando el ahorro en el consumo de agua para una empresa de gimnasios, descubren que la realización de pruebas físicas es muy demorada y costosa, por lo que deciden buscar ayudas tecnológicas, encontrando un aliado en Ansys por medio de los módulos Fluid flow CFX y Fluid flow Fluent para analizar la pérdida de calor y la salida de agua de la ducha.

Encuentran que mientras un ingeniero se tardaba más de una semana para elaborar y probar prototipos físicos, ahora era posible la experimentación en más de doce veces por día, utilizando la simulación virtual de Ansys, ahorrando tiempo y dinero y conservando los datos de cada prueba, por lo que pudieron hacer en poco tiempo cientos de pruebas y llegar prontamente a su objetivo. Además, hicieron uso del software CFD para probar variables en el diseño de la ducha como los ángulos en que las boquillas dispersan el agua, el tamaño de las gotas, presión, velocidad y flujo al interior del cabezal de la ducha. Crean una ducha con el equilibrio adecuado de temperatura, caudales, direcciones, patrones y tamaño de gota capaz de generar un ahorro superior de agua, al pasar de un consumo promedio en 8 minutos de 20 galones a tan sólo 6 galones en el mismo tiempo, y hallando en el programa Ansys un aliado significativo.

De otro lado, (Lin Xia, 2016) con el propósito de mejorar el desempeño de una torre de refrigeración, utilizan una boquilla de cono hueco para subenfriar el aire que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

entra, por medio de la aspersión de agua. Evalúan cuál es la posición en la que boquilla presenta mejor funcionamiento en la aspersión de agua al tiro de aire de la torre de enfriamiento mediante mediciones de velocidad y temperatura con Ansys Fluent 15, hacen las simulaciones virtuales pertinentes y luego pasan a hacer la fabricación del prototipo para probar experimentalmente en un túnel de viento que han fabricado. Concluyen, que las boquillas de orientación vertical presentan mejor rendimiento físico.

Bade, Kalata, y Schick (2010), en un estudio realizado para los servicios de investigación de la empresa Spraying Systems Co., buscan evaluar en boquillas de diferentes ángulos la distribución de pulverización, tanto virtual como físicamente. Para la experimentación virtual realizan en Ansys un proceso de CFD que les permite identificar la calidad de la pulverización del agua en boquillas que pasan por todos los grados en ángulos que varían desde los 0° hasta los 135°, midiendo aspectos como velocidad, orientación, temperatura, etc. Luego de valorar la información en Ansys utilizan un escáner de precisión ubicado en un túnel de viento para hacer pruebas físicas que les permite evaluar el tamaño, la velocidad y el recuento total de cada partícula que pasa a través del mismo. Los autores concluyen que los métodos empleados, tanto virtuales como físicos, permiten hacer una evaluación cualitativa de las características de pulverización de cada boquilla, para lo que han sido de gran ayuda los módulos CFD de Ansys.

ITM también realiza análisis CFD dentro del grupo de investigación MATyER-CADD gracias al uso de Ansys, así lo demuestran Riascos, Hincapié y Ardila (2015), en su trabajo “Potencial de los laboratorios del ITM en el análisis CFD para la innovación en Ingeniería” con el que explican las diversas potencialidades de los trabajos realizados en CAE (Ingeniería Asistida por Computador) para mejorarlos modos de enseñanza – aprendizaje en ITM y el desarrollo industrial de Medellín.

La *experimentación* sobre el funcionamiento de boquillas de cono hueco ha sido realizada por (Ahmad, y otros, 2011) quienes estudian el rendimiento en la aspersión de combustible líquido para cohetes, descubren que se precisa que el inyector rompa el combustible en gotas muy pequeñas con el fin conseguir un encendido rápido y silencioso. Los autores realizan pruebas físicas con agua y logran demostrar que el aumento de la presión de inyección conduce a un mayor ángulo de pulverización del cono, y a una mayor cantidad de pulverización, el inyector con el diámetro más pequeño conduce al ángulo más amplio de pulverización y un mayor diámetro del núcleo de aire lo cual permite mejorar la eficiencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El comportamiento de los fluidos es complejo debido a que intuitiva y físicamente es difícil de evidenciarlo y en ese proceso de atomización estamos forzando el fluido a que cambie de estado de líquido a gas llevando una secuencia para que esto suceda “En el remolino del inyector, el líquido es dirigido a través de una ranura sinuosa, así la velocidad tangencial es conducida en el fluido por un orificio y el cono de roció surge debido a la fuerza centrífuga, la hoja se vuelve inestable y se convierte en ligamentos, y luego estos se rompen y se convierten en gotas y posterior a esto se da a lugar a otra ruptura para producir agua pulverizada”

(Jia-Wei Ding, 2016)“Experimentalmente en la actualidad los estudios para predecir las características de la aspersión (ángulo, longitud de la ruptura de la película líquida y la distribución del cono) se centran en las propiedades macroscópicas de la atomización del líquido; pero faltan investigaciones sobre la inestabilidad de la película líquida y el proceso de la ruptura del ligamento, para poder observar la región más pequeña y densa donde se produce; no se ha revelado todo el mecanismo de la ruptura del chorro giratorio por lo que son necesarios experimentos e investigaciones complementarias”

Es muy difícil predecirlo, pero si lo queremos ver necesitamos una alta resolución espacial y temporal de la tecnología de visualización de ligamentos y gotas.

Los autores (Jia-Wei Ding, 2016) utilizan una rejilla fina de alta resolución y una computadora de alto rendimiento para registrar el comportamiento del chorro, mas no predice dicho comportamiento debido a las dificultades tecnológicas mencionadas anteriormente. Dentro de las investigaciones que analizan se encuentran las que estudian el crecimiento de perturbación de un remolino anular de hoja de líquido basado en el análisis de su inestabilidad. Otras que estudian el rendimiento de un atomizador simple. Algunas más que analizan la inestabilidad que lleva a la ruptura de una hoja de líquido anular por el uso del método de expansión de la perturbación, teniendo en cuenta la perturbación inicial, y la fuerza del remolino de gas en las características de ruptura. Expresan (Jia-Wei Ding, 2016) que hasta el momento, la literatura sobre la investigación teórica se basa en muchas suposiciones simples y es difícil predecir con precisión la ruptura de hoja sin tener en cuenta la compleja interacción entre el líquido y el gas. Piensan que hasta el momento, todo el mecanismo de ruptura de chorro giratorio no se ha revelado aún por medio de experimentos e investigaciones complementarias y que estas cada vez se hacen más necesarias.

Para analizar este proceso (Jia-Wei Ding, 2016) proponen un esquema de simulación realizado tanto computacional como físicamente y al que han llamado LES – VOF Large Eddy Simulation (LES) que significa simulación de grandes remolinos y Volumen Of Fluid (VOF) volumen de fluido, por medio de los cuales, estudian todo el proceso de funcionamiento de la boquilla de cono hueco para la aspersión de combustibles y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

presentan ecuaciones y métodos numéricos que permiten determinar cómo se dan numéricamente las fases de circulación del líquido y el aire al interior de la boquilla, el paso intermedio que se da entre el líquido y la descomposición de ligamentos hasta la formación de gotas que presentan una curva de distribución más ancha en la zona de aguas abajo.

Los autores hacen simulación computacional en dinámica de fluidos y los validan experimentalmente utilizando una computadora de alto rendimiento dotada con una resolución de rejilla fina que les permite identificar: la forma de la gota, su longitud media, hacer comparación de la distribución de las gotas a diferentes ángulos y presiones, para luego verificar los datos virtuales por medio de pruebas físicas.

Este trabajo aporta al tema de la optimización porque desarrolla un completo estudio tanto virtual como físico que permite identificar el funcionamiento de una boquilla de cono hueco a través de medios tecnológicos que permite reconocer por medio de ecuaciones numéricas cuál es el comportamiento esperado. Además confrontan la información tanto virtual como física de la simulación y el experimento de la boquilla a varias presiones, hallando similitudes entre ambas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La ingeniería inversa

La ingeniería inversa recorre el camino contrario que debe seguir o el que se sigue normalmente en la elaboración de un producto, no parte del diseño, si no de la pieza terminada, hasta establecer cómo fue hecha y de esta manera, proponer mejoras, en un proceso llamado reingeniería.

También permite producir un artículo a menor precio. Es una práctica legal y ampliamente extendida, que ha servido, desde la Segunda Guerra Mundial como herramienta para la innovación y un método para la enseñanza de la ingeniería, así lo informa el investigador Diego Alonso Acosta, quien en su texto *Uso de La ingeniería inversa como metodología de enseñanza en la formación para la innovación* (2013), explica:

La ingeniería inversa estudia o analiza un producto disponible en el mercado (software, dispositivo electrónico, pieza mecánica, estructura, etc.) con el fin de conocer detalles de su diseño, construcción y operación. La ingeniería inversa es usada como una forma de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

producir una versión mejorada del producto y no con el objetivo de producir una copia, como lo ha demostrado Corea y otros países asiáticos ha resultado ser no solo una excelente herramienta para la innovación, sino también una efectiva estrategia de enseñanza para adquirir las competencias de diseño e innovación requeridas en la formación de ingenieros. (pág. 1)

Para este autor, la ingeniería inversa se convierte en una oportunidad para la formación de ingenieros, porque parte de un nuevo comienzo, no se inicia de lo más pequeño (las ciencias básicas), sino de la propia experiencia (el objeto terminado), haciendo así un aprendizaje constructivista de base empírica y con sentido práctico, que parte de objetos físicos para formar abstracciones:

Las metodologías para enseñar a leer se pueden plantear de tres formas, primero entendiendo la lectura de acuerdo al modelo lineal modular(bottom-up), como un proceso detallado de percepción secuencial y de identificación de letras y palabras que forman frases, segundo de acuerdo al modelo holístico constructivista(top-down), como un proceso de formulación de hipótesis a partir de los conocimientos y experiencia del lector y su verificación, o finalmente de acuerdo al modelo interaccionista que surge de una combinación de los dos anteriores. Haciendo la analogía, la propuesta de incluir la Ingeniería inversa como metodología, es resultado de entender la enseñanza de la ingeniería como un proceso Top-Down, en contraste con los planes de estudio que tradicionalmente se orientan como un proceso bottom-up, comenzando por conceptos de ciencias básicas, los cuales se van enlazando para entender conceptos más complejos, que a su vez se articulan en aplicaciones de ingeniería. (Acosta Ramos, 2013, pág. 4)

Este proceso rescata la experiencia, a partir de ella formula hipótesis y las verifica, además, realiza operaciones concretas y sugiere las abstracciones necesarias, dando como resultado la innovación en la ciencia.

2.2 Uso del escáner 3D en los procesos de ingeniería inversa

Por diversos motivos, es necesario crear nuevos productos partiendo de los ya existentes, bien sea por que no es posible conseguirlos en un determinado lugar o para mejorarlos. Para lograrlo, se hace uso de las nuevas tecnologías, en un proceso llamado ingeniería inversa, que representa un avance en la formación de ingenieros, porque hizo: “que con la ayuda del computador la fabricación de productos fuera más precisa, a menor precio y más rápida” (Ojados González, 2010)

Los procesos de ingeniería inversa deben contar con una idea fiel del objeto que va a ser estudiado, en la actualidad se ha estado haciendo uso del escáner, para identificar características e ingresarlas al computador en una imagen 3D y así, realizar procesos de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Computación Avanzada y Diseño Digital (CADD) que permiten reconocer una estructura e intervenirla.

¿Cómo funciona el escáner 3D utilizado para ingeniería inversa?

Para una intervención CAD de ingeniería inversa se debe hacer una serie de tomas desde diferentes ángulos y distancias sobre el objeto físico, que pasan a configurar los contornos:

La digitalización 3D es el proceso por el que se obtiene la representación en formato computacional de un objeto físico. Por medio de la digitalización se obtiene una nube de puntos de gran densidad en pocos segundos y se recuperan las coordenadas de miles de puntos que definen la superficie del objeto. (Ojados)

El escáner de digitalización 3D, tiene el mismo proceso de funcionamiento de la cámara digital, debido a su campo de acceso en forma de cono, pero se diferencian en que la cámara toma la información sobre los colores en contacto con la luz, mientras que el escáner la toma de los contornos.

En su funcionamiento el escáner recoge una nube de puntos que van formando los contornos geométricos, estos luego pasan a ser una malla de triángulos, que finalmente definirán las coordenadas del objeto:

Ampliando las digitalizaciones obtenidas, se puede observar que cada una de las tomas está definida por una nube de puntos que posteriormente formarán una malla de pequeños triángulos. Igual que una imagen fotográfica está formada por millones de píxeles, una digitalización tridimensional se forma con esos puntos situados sobre el espacio. (Ojados González, 2010)

Los escáner 3D son utilizados para diversas utilidades como ingeniería, medicina, arte, arqueología, ciencias, educación, etc., ya que permiten tomar un contorno digital de la geometría de un artículo determinado, para luego hacer el vaciado a través de una impresora 3D que hace un proceso de prototipado rápido y facilita una réplica en un material plástico que reproduce el objeto físico inicial:

El trabajo que se realiza con el digitalizador se puede complementar con un sistema de prototipado rápido, lo que se conoce como impresión en 3D. “Podría darse el caso que fuera necesario reproducir el objeto con otras dimensiones o hacer varias reproducciones iguales para pruebas funcionales”. Para ello tenemos la máquina de prototipado rápido que permite a partir del archivo STL volver a construir el modelo físico utilizando un tipo de plástico que se conoce como ABS. (Ojados González, 2010)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Entre los objetivos más comunes para el uso de escáner3D se encuentran los de: “determinar la intención del objeto original, bien para modernizar los procesos de fabricación o bien para diseñar una nueva pieza que se adapte a una anterior.” (CAADDY)

Además encontramos que la información recogida por medio de escáner puede cumplir diferentes funciones en la ingeniería, tales como:

- Modelado 3D de objetos, independientemente de su tamaño.
- Modelado en 3D paramétrico en formatos genéricos y originales.
- Modificación del diseño de objetos existentes.
- Preparación de datos para la simulación digital.
- Reconstrucción de datos de escaneados en 3D.
- Reconstrucción de superficies.
- Reconstrucción híbrida.
- Reconstrucción para fabricación de prototipos. (CAADDY)

En este trabajo se enfatiza en las funciones de simulación digital y modificación del diseño inicial para generar una optimización.

2.3 Diseño Asistido por Computador - CAD (Computer Aided Design)

Las industrias ponen sus esfuerzos en el desarrollo de productos eficientes y de rendimiento avanzado, tal es el caso de la industria aeroespacial, la del automóvil y la industria del molde, en las que se hace fundamental contar con la capacidad de mejorar los diseños constantemente, para dar respuestas al entorno, donde el cambio continuo y la competitividad son de vital importancia para lograr el éxito en los mercados.

La ingeniería inversa parte de la optimización de elementos, en la cual no se da inicio desde la elaboración de las piezas en el taller, sino que se parte de la modelación digital sobre el objeto físico, para así realizar simulaciones previas que permitan anticipar resultados antes de ponerlos a prueba en el laboratorio. Con la tecnología CAD para la creación de modelos geométricos de los prototipos existentes, se hace ingeniería inversa, sobre todo cuando se crea o modifica en el taller una forma y cuando se hace un modelo digital del objeto. (Wang, Gu, Yu, Tan, & Zhou, Diciembre 2012)

Con el uso de la tecnología de la información (TI) en el proceso de diseño se produce un sistema CAD que consiste en hardware de TI, un software especializado y los dispositivos periféricos, que en ciertas aplicaciones son bastante especializados. Los núcleos de un sistema CAD son: el software que hace uso de gráficos para la representación de los productos, las bases de datos para almacenar el modelo del producto y los periféricos para la presentación del producto. Su uso no cambia la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

naturaleza del proceso de diseño, pero como el nombre indica, ayuda al diseñador que es el actor principal en el proceso, en todas las fases desde la identificación del problema a la fase de implementación.

El CAD proporciona:

- Precisión generando una representación gráfica fácilmente modificable del producto. El usuario puede ver el producto real en la pantalla, hacer modificaciones y presentar sus ideas sobre la pantalla sin ningún prototipo, especialmente durante las primeras etapas del proceso de diseño.
- Análisis de diseño complejo en poco tiempo.
- Implementación de Elementos Finitos.
- Diferentes métodos de análisis, el usuario puede realizar Análisis: estático, dinámico y de frecuencia natural, de transferencia de calor, plástico, de flujo de líquidos, de movimiento, de tolerancia, de optimización de diseño, grabar y recuperar información con consistencia y velocidad. Además, el uso de la gestión de datos del producto que puede almacenar todo el diseño e historial de procesamiento, para su reutilización y actualización futura. (Cfr. Bilalis, 2000)

2.4 Boquillas de cono hueco

En la industria es necesaria la utilización de boquillas para aspersión de diferentes líquidos, en usos como: fumigación, lavado, lubricación, humectación, lavado de gases, humidificación, protección contra incendio, lavado de carros, enfriamiento, blanqueo de pulpa, mitigación de gases tóxicos, control de olores, etc. (Cfr. Acodinsa, 2015). Las boquillas pueden generar procesos de aspersión en diferentes formas, de acuerdo a las necesidades, como: “Aspersores de chorro plano, cono lleno, cono hueco, accionadas con aire comprimido, especiales para lavado de tanques, de niebla fina, espirales, entre otras.” (Acodinsa, 2015).



Figura 1. Boquillas de aspersión de cono hueco (Acodinsa, 2015)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

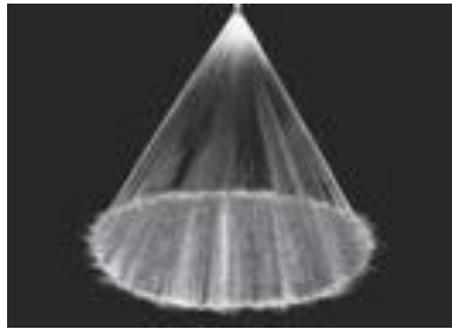


Figura 2. Boquillas de aspersión de cono lleno (Acodinsa, 2015)

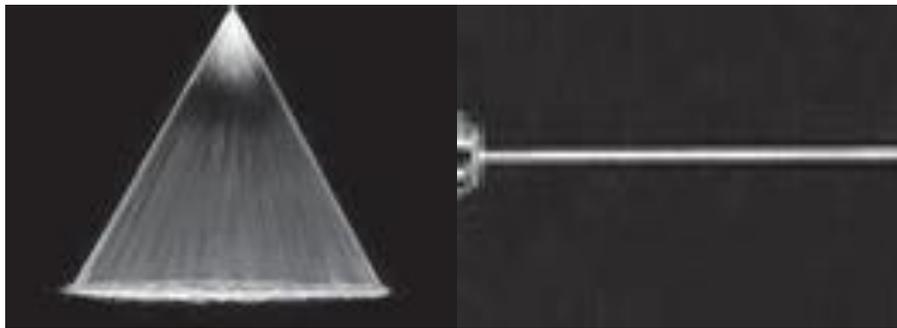


Figura 3. Boquillas de aspersión de chorro plano (Acodinsa, 2015)



Figura 4. Boquillas de niebla (Acodinsa, 2015)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 5. Boquillas operadas con aire comprimido (Acodinsa, 2015)

Para este estudio se analiza el proceso de funcionamiento de las boquillas de cono hueco, que a diferencia de las de cono lleno, son utilizadas en procesos que requieren optimización del líquido en aspersion.

Las boquillas de cono lleno, en su interior contienen líquido que es esparcido en forma cónica, tanto internamente como alrededor del cono, las boquillas de cono hueco, por su parte, sólo contienen el líquido en el perímetro, más no internamente, generando menor gasto:

Usadas con menor frecuencia que las de cono lleno, las boquillas de cono hueco producen un delgado anillo de líquido. El spray emitido es una forma cónica con líquido solamente en el perímetro de la circunferencia inferior que dibuja el cono. Cuando el spray intercepta con una superficie, un anillo de spray es formado con un centro hueco. (Acodinsa, 2015).

Las boquillas de cono hueco se utilizan, por ejemplo, para la atomización de los combustibles, en secado por pulverización y en torres de lavado para polvo y gas.

El principio de funcionamiento de la boquilla se compone de un distribuidor que tiene forma de espiral, de un cilindro y de una parte cónica adyacente, así como de un orificio.(ver figura 6) El distribuidor genera un flujo rotacional que consigue acelerar el fluido, conforme el diámetro de la boquilla disminuye hacia la salida.

Dependiendo de los datos de operación, las propiedades de transporte y la geometría, se forma el núcleo de gas rotacionalmente simétrico en la zona del eje de la boquilla. La película líquida resultante en la salida de la boquilla se ensancha en forma de un cono después de salir de la boquilla y se desintegra en goteras aguas abajo. (Nonnenmacher & Piesche, 2000)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

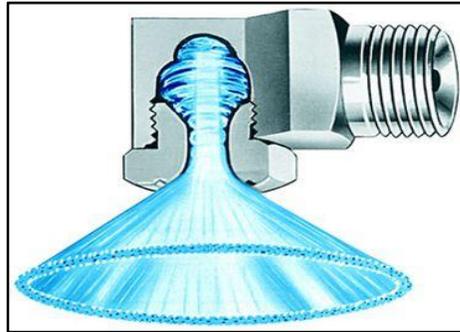


Figura 6. Funcionamiento boquilla de cono hueco. (Nonnenmacher & Piesche, 2000)

2.5 Ansys

Dentro de los procesos de ingeniería se encuentra un tema complejo como es la caracterización del comportamiento de fluidos, que se ha hecho de manera un poco intuitiva por la lenta fabricación de prototipos para la realización de pruebas físicas y que pueden ser poco confiables y muy costosas. Motivo por el cual toma cada día más fuerza, la realización de pruebas virtuales antes de la fabricación de modelos definitivos.

Ansys constituye una herramienta indispensable en ingeniería para efectos de simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Es utilizado actualmente para realizar simulaciones en todos los campos de la física, que incluyen: fluidos, estructuras, electrónica, semiconductores, sistemas, entre otros. Ansys, ha venido prestando sus servicios a empresas de todo tipo, como: la aeronáutica, de ingeniería, defensa, automovilística, construcción, energía, salud, química, etc.

Dentro del módulo de fluidos Ansys ofrece tres subproductos:

Ansys CFD (Dinámica de Fluidos Computacional): Tiene la posibilidad de hacer simulaciones en 3D de aspectos como: “análisis de multifísica, incluyendo las fuerzas de fluido, efectos térmicos, la integridad estructural y la radiación electromagnética, para evaluar y optimizar al máximo su producto.” (ANSYS, 2016)

Ansys Fluent: Herramienta de software especializada en el modelado físico, que permite realizar acciones como: “modelar el flujo, turbulencia, transferencia de calor, y las reacciones para aplicaciones industriales que van de flujo de aire sobre un ala de avión a la combustión en un horno, a partir de columnas de burbujas a las plataformas de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

petróleo, de flujo de sangre, al semiconductor y de fabricación y de diseño de la sala limpia para plantas de tratamiento de aguas residuales” (ANSYS, 2016)

Ansys CFX: Permite predecir el comportamiento del flujo de elementos en máquinas rotativas, tales como: “bombas, ventiladores, compresores y turbinas hidráulicas y a gas.” (ANSYS, 2016)

2.6 Computational Fluid Dynamics - CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) tiene como objetivo la simulación de fluidos y los procesos de transferencia de calor. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía en el seno de un fluido, son numerosos los sectores industriales en los que se utilizan los métodos computacionales para el análisis y diseño (CAD). El hecho de que la CFD se haya desarrollado más tarde que otros CAD, como los utilizados para el análisis de tensiones térmicas son debido a las dificultades inherentes que se presentan en las ecuaciones que describen el flujo de fluidos; Se utiliza el software de CFD para analizar el flujo de líquido, gas o vapor a su paso a través de los diferentes componentes de una máquina, con el fin de diagnosticar problemas operacionales o conseguir mejoras en el diseño. (Barazal, Flores, & Sala, 2001)

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo es descriptiva y experimental:

Es **descriptiva**, porque registra paso a paso las acciones emprendidas en el proceso. Este tipo de investigación, aborda realidades establecidas que requieren ser estudiadas: “La investigación descriptiva comprende el registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, o sea trabaja sobre realidades de hecho presentes.” (González Castellanos, Lavín, & Curiel Lorenzo, 2003).

Es **experimental**, porque todos los diseños son validados por medio de la experimentación de su funcionamiento, tanto virtual como físicamente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para realizar este trabajo se ha necesitado de una boquilla de cono hueco para aspersión de agua, se ha hecho uso del Scanner 3D Artec Spider y el programa Ansys Workbench V16.2 con su respectivo equipo acondicionado para realización de simulaciones virtuales. Los materiales tecnológicos han sido facilitados por el laboratorio de Computación Avanzada y Diseño Digital de ITM y la orientación del Grupo de Investigación MATyER-CADD (Materiales Avanzados y Energía con énfasis en la Computación Avanzada y Diseño Digital).

El desarrollo de La metodología se divide en cinco fases:

Fase I-Digitalización: En la fase inicial de ingeniería inversa se obtiene un modelo CAD de la boquilla existente mediante un proceso de digitalización 3D utilizando el escáner Artec Spider® que permite conseguir una imagen virtual del aspersor con el fin de identificar su estructura y pasarla al programa Ansys para iniciar el proceso CFD:

“Artec Spider

Una herramienta indispensable para los usuarios CAD e inventores de todo tipo. El Spider de Artec captura de manera efectiva, con una precisión asombrosa y en colores brillantes los detalles más intrincados de objetos pequeños, ofreciendo así posibilidades casi que ilimitadas en el campo de la ingeniería inversa, el control de calidad, el diseño de productos y manufactura, y muchos más.” (Artec 3D scanners)

Fase II-Simulación computacional: Se realiza la simulación fluido-dinámica en el software ANSYS Workbench V16.2 en el módulo Fluent® para obtener el comportamiento virtual del flujo de agua del aspersor, el Programa Ansys Permite hacer simulación en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), probando el funcionamiento de la boquilla en su diseño CAD con diferentes geometrías hasta obtener el comportamiento numérico del flujo de agua tanto al interior como en el exterior del aspersor.

Fase III-Experimentación: Se valida experimentalmente los resultados obtenidos mediante la simulación computacional. Una vez validado el modelo computacional, se modela la geometría de una boquilla control, para realizar pruebas físicas que verifiquen el proceso de optimización, mediante nuevas simulaciones computacionales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La geometría que presenta mejor comportamiento fluido dinámico, tanto física como virtualmente, pasa a la fase de fabricación y a una nueva validación experimental para realizar una comparación final entre el modelo optimizado y el modelo existente.

Fase IV-Optimización: Con el modelo computacional validado se analizan numéricamente diferentes geometrías, variando principalmente la geometría del aspersor y conservando las condiciones de funcionamiento, buscando la optimización de la boquilla.

Fase V-Fabricación: Se fabrica el modelo que presente mejor comportamiento en la fase IV y se realiza una comparación numérico-experimental final entre el modelo optimizado y el modelo existente.

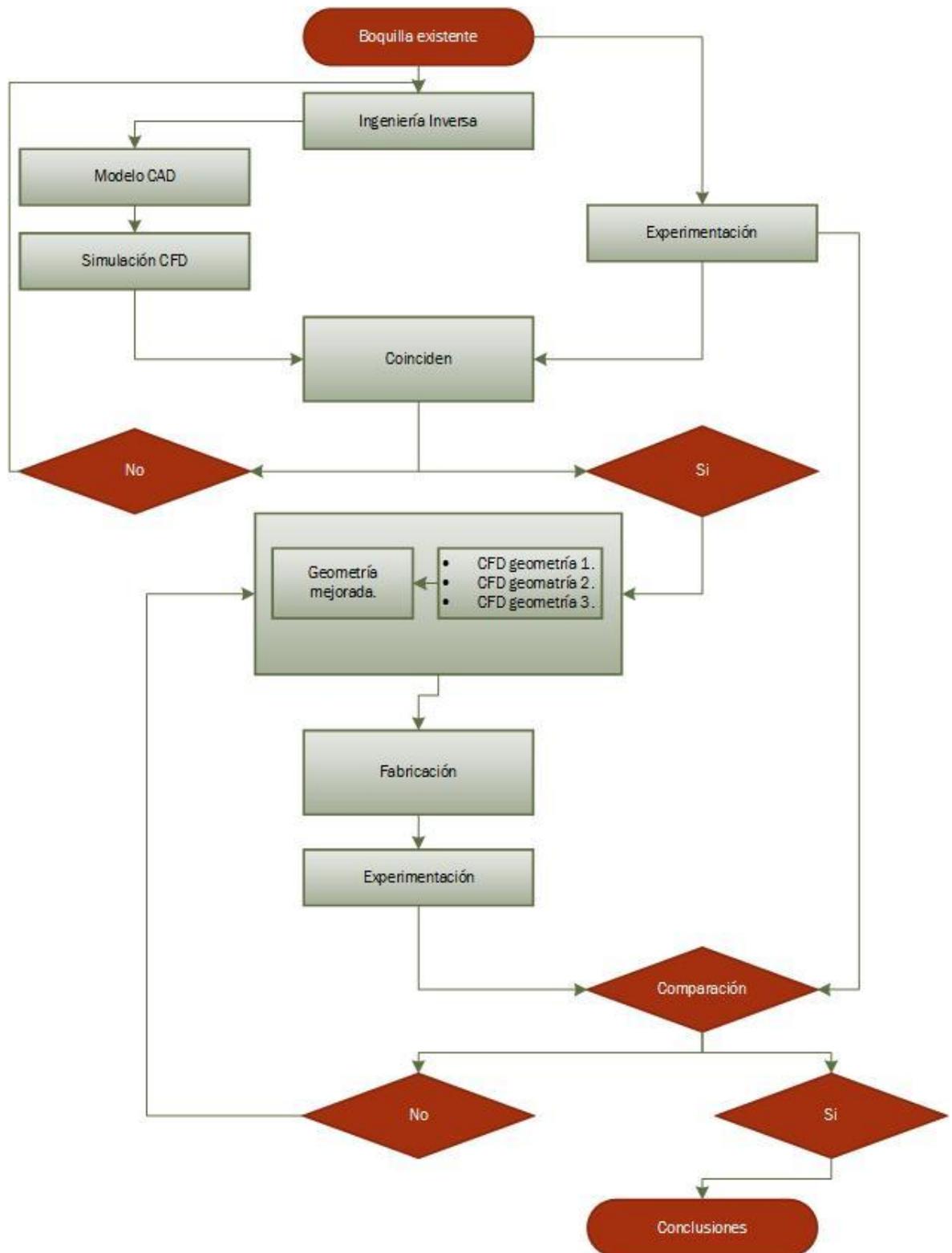


Figura 7. Diagrama de flujo del procedimiento para obtener el aspersor requerido. (Elaboración propia)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados:

Se presentan los resultados de acuerdo a cada una de las fases de intervención propuestas en la metodología.

Fase I-Digitalización

Se obtiene un modelo CAD de la boquilla existente, basado en un proceso de digitalización utilizando el Programa de Diseño por computador *Inventor*.¹



Figura 8. Boquilla inicial BETE WT 40080 (Fuente propia)

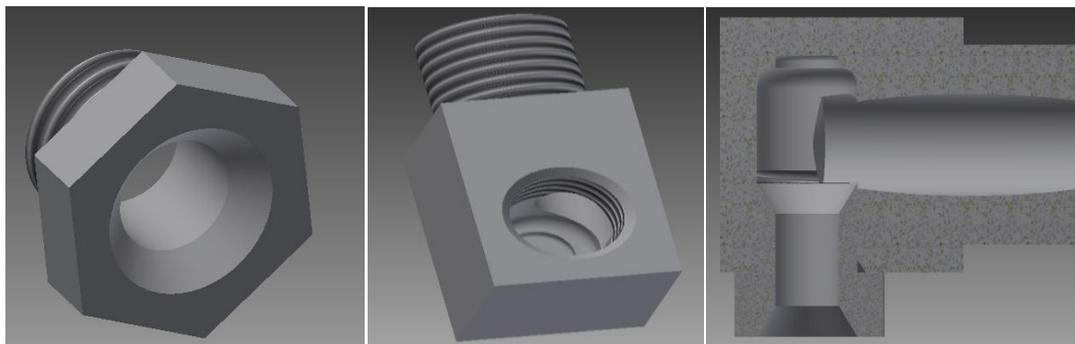


Figura 9. Modelo CAD Boquilla WT 40080: a) Cilindro con parte cónica adyacente –b) Distribuidor con forma de espiral – c) Ensamble seccionado. (Fuente propia)

Fase II-Simulación computacional

La simulación fluido-dinámica se realiza a través del software ANSYS Workbench V16.2® en el módulo CFX® para obtener el comportamiento virtual de la boquilla de aspersión de

¹ Se hace un diseño CAD a través del programa *Inventor*, debido a las características geométricas del objeto, se levanta el plano fácilmente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cono hueco. Con el modelo CAD de la boquilla se procede a modificar su geometría y realizar pruebas virtuales en busca de un mejor funcionamiento para proceder a fabricar y validar en la experimentación física.

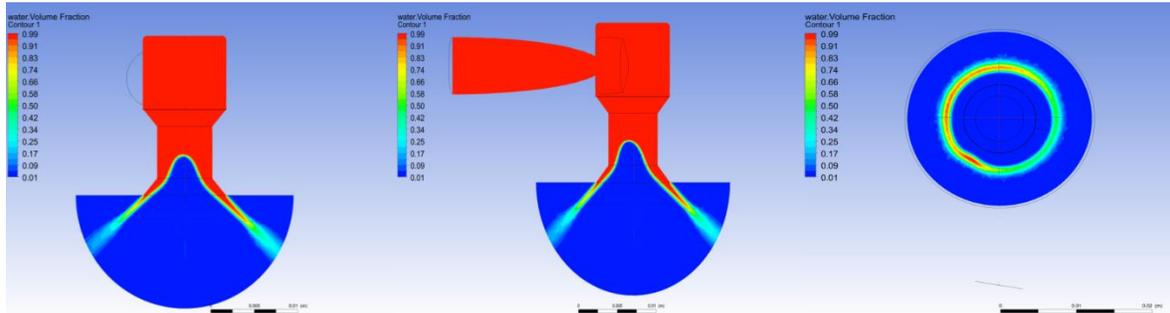


Figura 10. Simulación a 80° a 0,22 kg/s Comportamiento de la boquilla original. Vista frontal, lateral y superior.

El modelo computacional corresponde a la caracterización transitoria de un fluido multifasico conformado por agua y aire, el modelo de turbulencia seleccionado fue el k- ω con tratamiento automático de las paredes del volumen de control. Las condiciones de frontera corresponden a un flujo másico de 0.22 kg/s, el cual se establece como condición de operación recomendado por el fabricante de la boquilla de cono hueco comercial, condiciones de presión atmosférica a la salida del volumen de control y condiciones de pared suave configuran los límites del volumen de control por el cual se restringe el flujo de fluido.

Fase III-Experimentación

Esta fase es transversal a todo el trabajo. Los resultados experimentales validan todos los datos obtenidos en la simulación virtual o en catálogos del fabricante de la boquilla de aspersión con que se inicia el proyecto.

Se desarrolla en el laboratorio de fluidos del ITM, que cuenta con un banco de pruebas, el cual, permite recircular agua entre dos tanques y tiene uno acondicionado para controlar el flujo de agua hacia él, variando la velocidad de la bomba que la suministra.



Figura 11. Laboratorio de fluidos ITM, fuente ITM

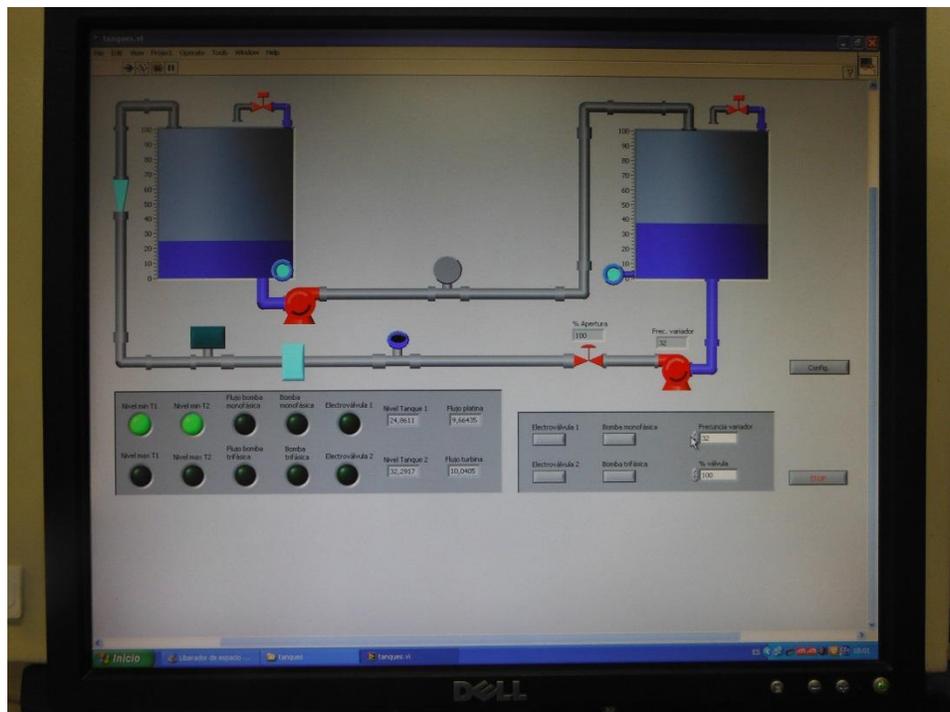


Figura 12. Interface laboratorio de fluidos ITM, fuente ITM

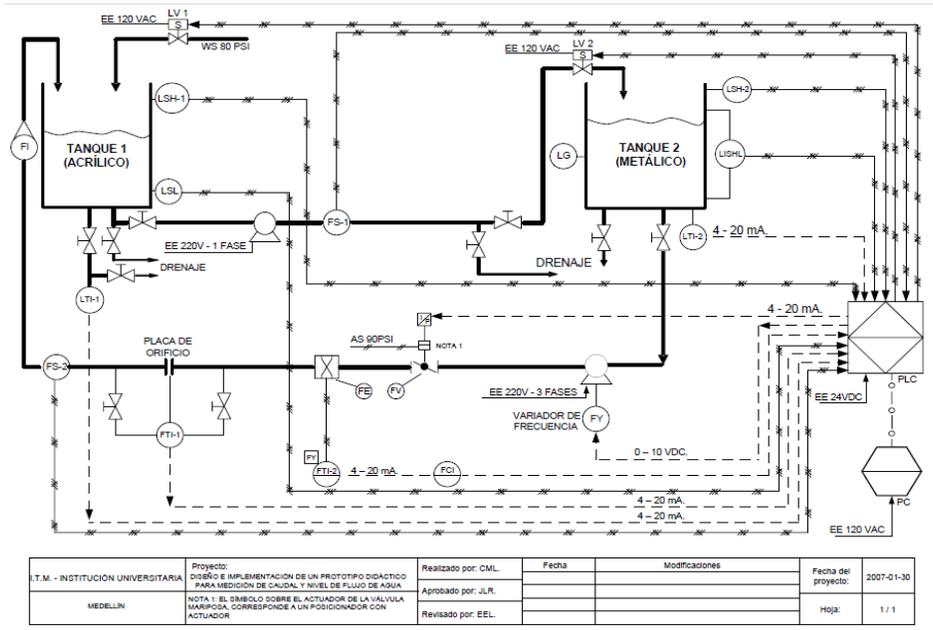


Figura 113. Módulo del laboratorio de fluidos (fuente ITM)

Posee un medidor de flujo que funciona con un rotámetro y da lectura en galones por minuto y litros por minuto, pero la escala de medida es a partir de 4 galones por minuto, razón que nos condiciona a realizar tara del flujo de agua durante algunas pruebas.

Es un tanque construido en lámina de acrílico transparente de 10 mm de espesor, con un diámetro de 79,5 cm y una altura de 98 cm y una regla que mide su altura, el diámetro es constante.

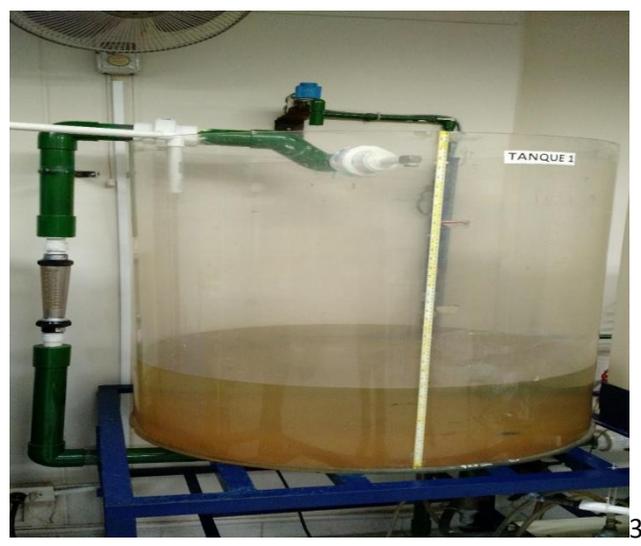


Figura 14. Tanque 1 acrílico. Fuente Laboratorio de fluidos ITM Medellín

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Características de los elementos utilizados en las pruebas realizadas en el laboratorio de fluidos del ITM son los siguientes:

ROTÁMETRO

Marca DWYER

Referencia UV – 5115

Presión Máxima 150 psi. (10.34 bar.)

Constitución y Material Cuerpo policromado con flotador interno

Exactitud $\pm 2\%$ a máxima escala @ 70 °F ± 2 °F (21.1 °C) y 14.7psi.

Repetitividad $\pm 1\%$ a máxima escala @ 70 °F ± 2 F (21.1 °C) y 14.7psi.

Peso 1. lb. (457 g.)

BOMBA CENTRÍFUGA TRIFÁSICA

Bomba IHM Motor Siemens

Potencia 1.8 HP

Voltaje 220 – 440 V

Amperaje 2.8 - 5.6 Amperios

Velocidad 3450 RPM.

Diámetro en la succión 1 ¼"

Diámetro en la descarga 1"

VARIADOR DE VELOCIDAD

Marca SIEMENS

Modelo MICROMASTER MM150/2

Voltaje de entrada 1 – 3 AC 230 V $\pm 15\%$

Rango de salida 2 HP

Corriente 7.4 Amperios

Frecuencia de entrada 47 – 63 Hz

Frecuencia de salida 0 - 400 Hz

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para comenzar esta fase, se hizo un análisis e investigación acerca de qué elementos o dispositivos son necesarios para efectuar pruebas en las que se pueda evidenciar las condiciones de operación de la boquilla inicial y de la boquilla optimizada que fueron simuladas mediante el software CFD.

Se valida experimentalmente:

- La boquilla inicial con respecto al catálogo del fabricante (qué funcione como el fabricante dice que funciona)
- La simulación de la boquilla inicial en Ansys con los datos arrojados por la primera prueba experimental y
- La boquilla mejorada con respecto a la simulación CFD.

Además se comparan las condiciones de operación de las dos boquillas (inicial y mejorada) para comprobar la optimización y simulación CFD.

Las condiciones de operación que se necesita evidenciar son:

- Flujo másico a través de la boquilla
- Ángulo de apertura del cono de aspersión formado a la salida de la boquilla, y
- Distribución del agua en el patrón circular formado en la base del cono de aspersión.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas:

- **Flujo másico.** Para tomar las evidencias requeridas se utilizó el medidor de flujo (rotámetro) que tiene el banco de pruebas y en ocasiones debido a la escala de este medidor se realizó un aforo volumétrico al flujo de agua tomando el tiempo de duración de la prueba y el volumen ocupado por el agua en este tiempo; después de tener el valor del caudal, que es en galones por minuto o litros por minuto, se calcula el flujo másico, multiplicando la cantidad de agua medida por la densidad del agua ($1000\text{Kg}/\text{m}^3$).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\text{ÁREA}_{\text{CIRCULO}}(A) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 ; D = \text{Diámetro} \text{ Ecuación 1}$$

$$\text{VOLÚMEN}(V) = (h)\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 ; D = \text{Diámetro} ; h = \text{Altura} \text{ Ecuación 2}$$

$$\text{CAUDAL}(Q) = \frac{V}{t} ; V = \text{Volúmen} ; t = \text{tiempo} \text{ Ecuación 3}$$

$$\text{DENSIDAD DE AGUA}(d) = \frac{1000\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Ecuación 4}$$

$$\text{FLUJO MÁSICO} = Q \times d ; Q = \text{Caudal} ; d = \text{densidad} \text{ Ecuación 5}$$

La siguiente tabla se utilizó para la toma de los resultados experimentales con las boquillas y la simplificación de las ecuaciones anteriores y se repite para cada experimentación.

Boquilla					
Diámetro tanque en cm	79,5				
Altura (cm)	0				
Tiempo (m)	0	Tiempo (s)	0		
Volumen cm3	0	Volumen Lt	0		
Area tanque cm2	4964				
Caudal Q	0,00	l/min			
Presion bar	0,00				
Presion psi	0				
			Caudal	0	l/s
			Caudal	0	GPM
			Flujo masico	0	Kg/s

Tabla 1. Tabla para la toma de datos experimentación boquillas, fuente propia

Primera prueba de flujo:

Con un valor de presión indicado en el catálogo, se realiza la primera prueba experimental, en la que se realiza un aforo volumétrico para constatar el flujo de agua en las boquillas; en esta prueba se validaron los datos entregados en el catálogo del fabricante y esta prueba se repite para la boquilla mejorada, se concluye que los datos obtenidos concuerdan.

Dimensions are approximate. Check with BETE for critical dimension applications.

WT Flow Rates and Dimensions <i>Hollow Cone, Medium and Extra Wide Spray Angles, 1/8" to 3/4" Pipe Sizes</i>																							
Male or Female Pipe Size	Nozzle Number	Spray Angle	K Factor	GALLONS PER MINUTE @ PSI								Approx. (in.)		Dimensions for Metal Only (in.)								Wt. (oz.)	
				5 PSI	10 PSI	20 PSI	30 PSI	40 PSI	60 PSI	80 PSI	100 PSI	Inlet Dia.	Orifice Dia.	A	B	C	D	E	F	G	H	Metal	Plas.
1/4	WT53	80°	0.084	0.19	0.27	0.37	0.46	0.53	0.65	0.75	0.84	0.09	0.11	1.31	1.00	0.79	0.63	1.12	0.81	0.79	0.63	1.75	0.50
	WT60	70°	0.095	0.21	0.30	0.42	0.52	0.60	0.73	0.85	0.95	0.10	0.11										
	WT68	120°	0.108	0.24	0.34	0.48	0.59	0.68	0.83	0.96	1.08	0.10	0.13										
	WT80	120°	0.126	0.28	0.40	0.57	0.69	0.80	0.98	1.13	1.26	0.13	0.13										
	WT100	70° 115°	0.158	0.35	0.50	0.71	0.87	1.00	1.22	1.41	1.58	0.13	0.14										
	WT130	120°	0.206	0.46	0.65	0.92	1.13	1.30	1.59	1.84	2.06	0.15	0.16										
	WT150	120°	0.237	0.53	0.75	1.06	1.30	1.50	1.84	2.12	2.37	0.16	0.17										
	WT160	70°	0.253	0.57	0.80	1.13	1.39	1.60	1.96	2.26	2.53	0.16	0.17										
	WT180	120°	0.285	0.64	0.90	1.27	1.56	1.80	2.20	2.55	2.85	0.18	0.18										
	WT200	70° 120°	0.316	0.71	1.00	1.41	1.73	2.00	2.45	2.83	3.16	0.18	0.19										
	WT220	120°	0.348	0.78	1.10	1.56	1.91	2.20	2.69	3.11	3.48	0.18	0.22										
	WT240	120°	0.379	0.85	1.20	1.70	2.08	2.40	2.94	3.39	3.79	0.20	0.20										
	WT260	80°	0.411	0.92	1.30	1.84	2.25	2.60	3.18	3.68	4.11	0.20	0.20										
	WT280	80°	0.443	0.99	1.40	1.98	2.42	2.80	3.43	3.96	4.43	0.20	0.22										
	WT300	70° 100°	0.474	1.06	1.50	2.12	2.60	3.00	3.67	4.24	4.74	0.20	0.22										
	WT340	80°	0.538	1.20	1.70	2.40	2.94	3.40	4.16	4.81	5.38	0.22	0.24										
WT400	80°	0.632	1.41	2.00	2.83	3.46	4.00	4.90	5.66	6.32	0.25	0.28											
WT480	80°	0.759	1.70	2.40	3.39	4.16	4.80	5.88	6.79	7.59	0.25	0.27											
WT580	80°	0.917	2.05	2.90	4.10	5.02	5.80	7.10	8.20	9.17	0.27	0.30											
WT640	80°	1.012	2.26	3.20	4.53	5.54	6.40	7.84	9.05	10.12	0.27	0.30											
WT680	80°	1.075	2.40	3.40	4.81	5.89	6.80	8.33	9.62	10.75	0.27	0.34											
WT800	80°	1.265	2.83	4.00	5.66	6.93	8.00	9.80	11.31	12.65	0.27	0.34											

Figura 15. Datos del funcionamiento de boquilla BETE WT 400 80 catálogo del fabricante (catálogo BETE)

En la tabla siguiente se registran los datos obtenidos en la prueba. Diámetro del tanque y altura ocupada por el agua durante la prueba, con estos datos se calculó el volumen de agua que fluye por la boquilla durante la prueba. Con el volumen calculado se procede a calcular el caudal dividiendo el dato del volumen por el tiempo que demoró este volumen de agua en pasar por la boquilla.

Estos son los datos que arrojan las pruebas de flujo másico realizadas a la boquilla inicial:

Boquilla original 1/4-10 psi					
Diametro tanque (cm)	79,5				
Altura(cm)	2				
Tiempo (m)	1,2	Tiempo (s)	80		
Volumen cm ³	9928	Volumen Lt	10		
Area tanque cm ²	4964				
Caudal Q	8,27	I/min			
Presion bar	0,69				
Presion psi	10				
			Caudal	0,12409782	I/s
			Caudal	1,96720452	GPM
			Flujo masico	0,12409782	Kg/s

Tabla 2. Pruebas de flujo boquilla original a 10 psi

Boquilla original 1/4 -30 psi					
Diametro tanque	79,5				
Altura (cm)	8				
Tiempo (m)	3	Tiempo (s)	180		
Volumen cm ³	39711	Volumen Lt	40		
Area tanque cm ²	4964				
Caudal Q	13,24	I/min			
Presion bar	2,06				
Presion psi	30				
			Caudal	0,22061834	I/s
			Caudal	3,49725248	GPM
			Flujo masico	0,22061834	Kg/s

Tabla 2. Pruebas de flujo boquilla original a 30 psi

El resultado de esta prueba que se realiza a presiones de 10 psi y 30 psi en la tubería antes de la boquilla. Se calculó un caudal de 1,96 galones por minuto. En el catálogo aparece un valor de 2 galones por minuto. Es un resultado que valida el funcionamiento de la boquilla original y permite avanzar en el proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	03
				Fecha	2015-01-22

También se hacen las respectivas pruebas de flujo a la boquilla mejorada, la cual arroja los siguientes datos:

Boquilla mejorada 1/4 - 10 psi					
Diametro tanque	79,5				
Altura	4,5				
Tiempo (m)	3	Tiempo (s)	180		
Volumen cm ³	22338	Volumen Lt	22		
Area tanque cm ²	4964				
Caudal Q	7,45	I/min			
Presion bar	0.689476				
Presion PSI	30				
			Caudal	0,12409782	I/s
			Caudal	1,96720452	GPM
			Flujo masico	0,12409782	Kg/s

Tabla 3. Pruebas de flujo boquilla mejorada a 10 psi

Boquilla mejorada 1/4 - 30 psi					
Diametro tanque	79,5				
Altura	8				
Tiempo (m)	3	Tiempo (s)	180		
Volumen cm ³	39711	Volumen Lt	40		
Area tanque cm ²	4964				
Caudal Q	13,24	I/min			
Presion bar	2,06				
Presion psi	30				
			Caudal	0,22061834	I/s
			Caudal	3,49725248	GPM
			Flujo masico	0,22061834	Kg/s

Tabla 4. Pruebas de flujo boquilla mejorada a 30 psi

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ángulo de apertura del cono de aspersión. Para validar este dato se toman fotografías a la aspersión de agua y posteriormente, con la ayuda de herramientas computacionales, se mide el ángulo formado en el cono de aspersión a la salida de la boquilla.

Procedimiento:

Se prueba la boquilla que ha sido comprada en el mercado para verificar su funcionamiento de acuerdo al catálogo.

Efectivamente tiene un ángulo aproximado de aspersión de 80° a cualquier presión. Hacemos dos pruebas, la primera a 10 psi, la segunda a 30 psi, encontrando el ángulo aproximado de aspersión de 80° en ambas.



Figura 16 Ángulo de apertura a 10 psi boquilla WT 40080.fuente propia

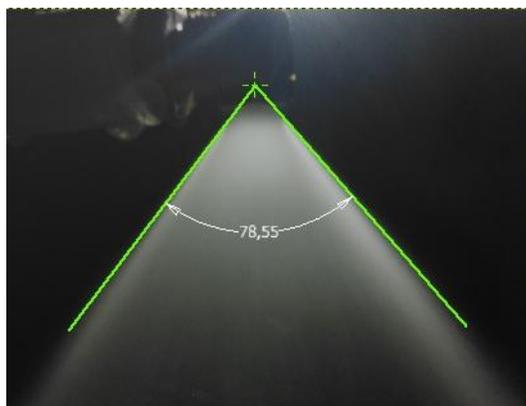


Figura 17. Ángulo de apertura a 30 psi boquilla WT 40080 fuente propia

Posteriormente se verifica el funcionamiento de la boquilla mejorada tanto a 10 psi como a 30 psi

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

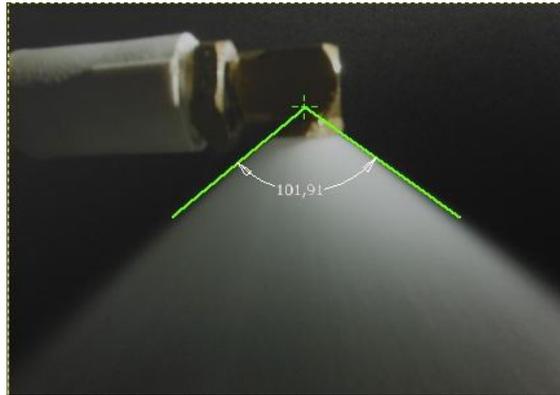


Figura 18. Ángulo de apertura a 10 psi boquilla mejorada. Fuente propia

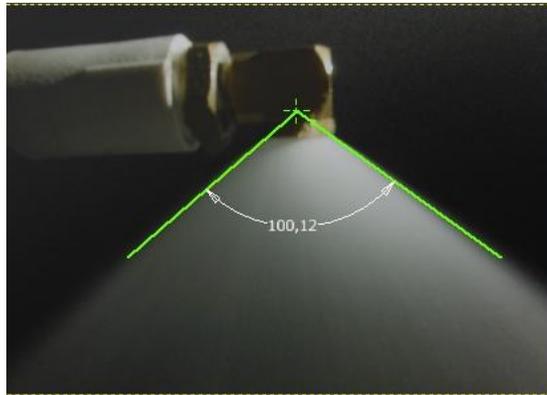


Figura 19. Ángulo de apertura a 30 psi boquilla mejorada fuente propia

Se observa que las boquillas original y mejorada presentan un comportamiento estable, de acuerdo a lo esperado, ya que a ambas presiones de 10 psi y 30 psi genera un ángulo aproximado de aspersión del cono de 80° en la boquilla original y la mejorada de 100°.

Se puede determinar qué:

- Ambas boquillas copian el ángulo de aspersión que se ubica en el distribuidor.
 - Ambas boquillas presentan una tendencia constante en la aspersión a diferentes presiones de operación ya que la diferencia de medida de los ángulos en las diferentes pruebas es insignificante.
- **Distribución del agua en el patrón circular formado en la base del cono de aspersión.** Para medir la distribución del agua en el patrón circular formado por la aspersión, se fabricó un dispositivo octogonal (8 lados iguales) de 360°, con 8 divisiones a 45° cada una, con respecto a la siguiente y a la anterior. Esto nos

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

permite seccionar el patrón circular formado en la base del cono de aspersión en 8 partes iguales, y recolectar el agua de cada una de estas secciones que posteriormente, es pesada y tabulada para medir la distribución de agua en cada segmento y evidenciar un comportamiento mostrado en la simulación CFD de las boquillas; comportamiento que a simple vista es imposible determinar y en los laboratorios del ITM no se cuenta con la tecnología necesaria para capturar en imágenes el comportamiento fluido dinámico del agua u otro líquido.

Procedimiento:

1. Evitar el error: Hacer uso de plomada y nivel de gota para ubicar los implementos de manera adecuada, logrando así que el agua tenga una distribución uniforme desde el centro del octágono.



Figura 20. Uso de la plomada para centrar la boquilla sobre el centro de la circunferencia (Fuente propia)

Por el uso de la plomada se logra hacer que el centro de la boquilla coincida con el centro del artefacto diseñado para realizar las pruebas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

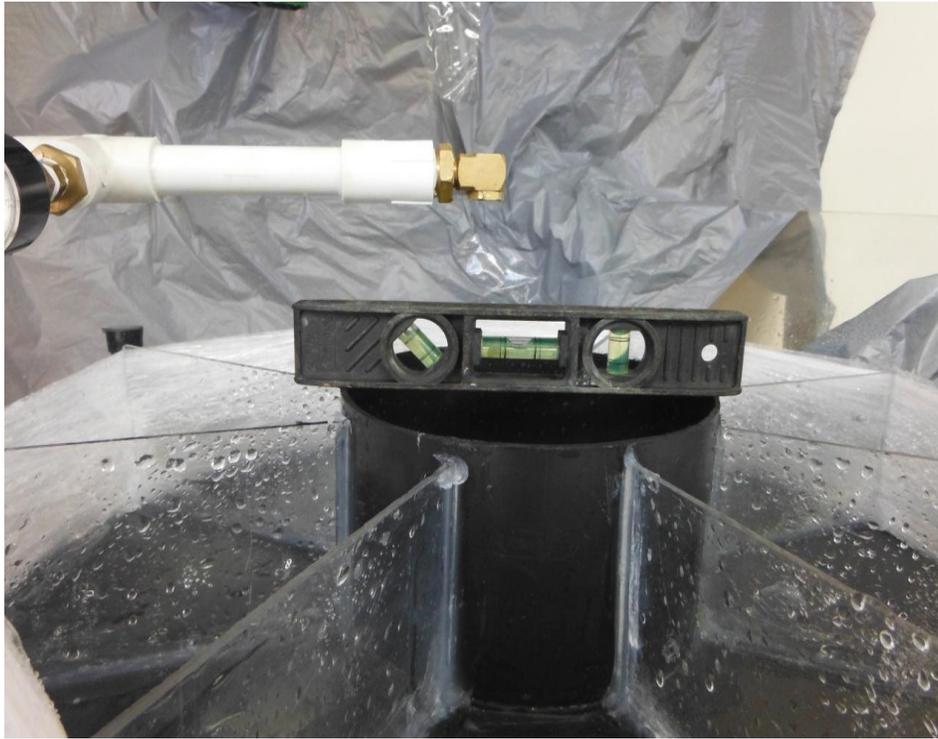


Figura 21. Ubicación del nivel de gota. Fuente propia

Con el artefacto ubicado sobre el fondo del tanque se coloca encima el nivel de gota para comprobar que se encuentra uniforme, de tal manera que no se concentre al correr del agua en alguna sección del círculo.

2. Observar: la distribución del agua con las dos boquillas. Cuál es la impresión que surge al observar correr el agua de la boquilla. ¿Es uniforme? ¿Parece concentrarse en alguna sección del círculo?

Con el octágono numerado en cada una de las secciones se ubica siempre el tubo debajo de la sección No. 1 para poder hacer que los datos de distribución del agua en ambas boquillas coincidan.

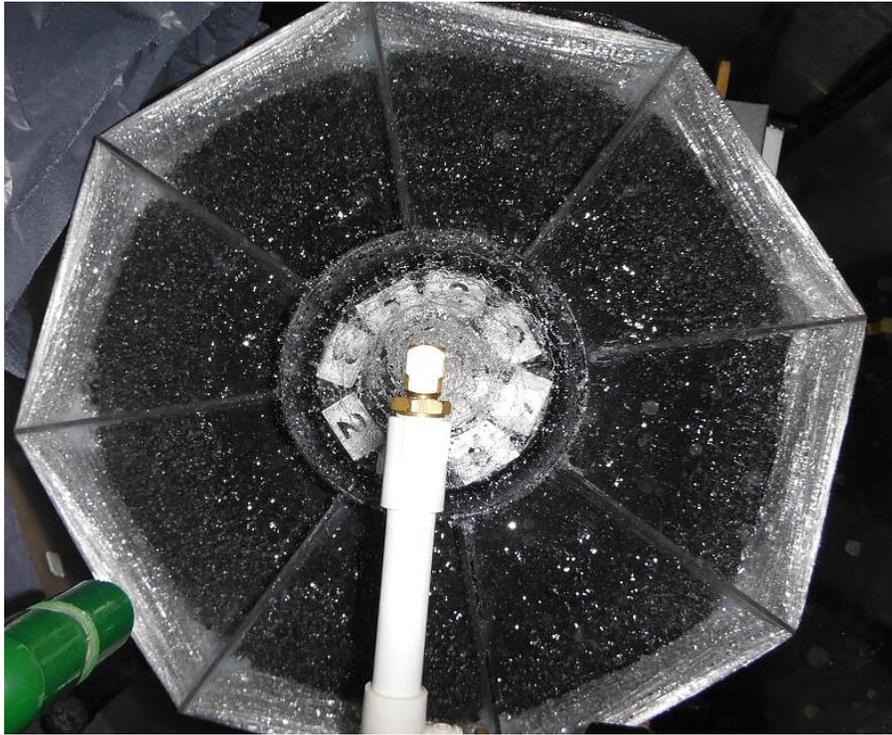


Figura 22. Pruebas de distribución boquilla original. Fuente propia

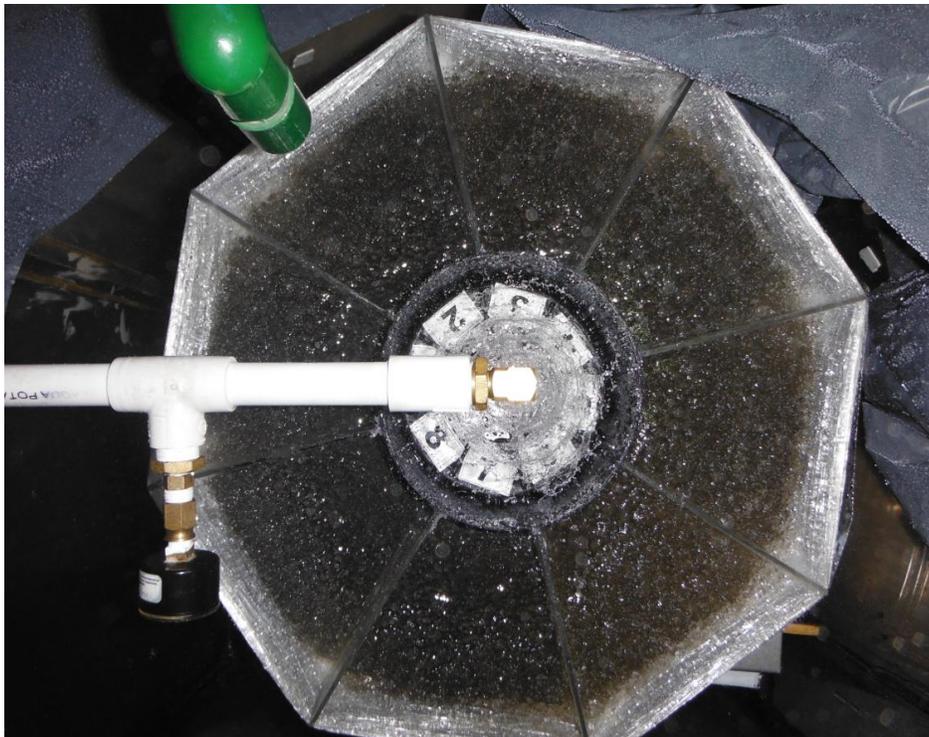


Figura 23. Prueba de distribución boquilla mejorada. Fuente propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por simple observación no es posible determinar hacia qué lado está fluyendo el agua o si hay alguna concentración de la misma en algún sector de la circunferencia, el agua se ve correr de manera uniforme en las pruebas realizadas con ambas boquillas.

Se hacen observaciones desde diferentes ángulos y se toman fotografías con y sin flash, y con diferentes tipos de luz y a simple vista no se puede determinar alguna diferencia significativa, motivo por el cual se toma la decisión de extraer el agua contenida en cada una de las secciones del octágono para ser pesada en una balanza. (A.A. Ibrahim and M.A.Jog, 2008). Mencionan que hasta el momento, la literatura sobre la investigación teórica se basa en muchas suposiciones simples y es difícil predecir con precisión la ruptura de hoja sin tener en cuenta la compleja interacción entre el líquido y el gas. Experimentalmente, estudios se llevan a cabo para predecir las características de atomización (ángulo de pulverización, la longitud de ruptura de la película líquida, y el tamaño de la distribución) de remolinos de pulverización. Aunque ha habido muchas investigaciones sobre las características de pulverización del chorro giratorio, la mayoría de ellas se centran en las propiedades macroscópicas de la atomización, pero aún faltan más investigaciones sobre la inestabilidad de la película líquida y el proceso de ruptura del ligamento. Además, para poder observar la región pequeña y densa, donde se producen, es necesaria una alta resolución espacial y temporal de la tecnología de visualización de ligamentos y gotas. Hasta el momento, no se ha revelado todo el mecanismo de ruptura de chorro giratorio por lo que son necesarios experimentos e investigaciones complementarias.

(Jia-Wei Ding, 2016) De Villiers y col. utiliza el método de LES-VOF para investigar la atomización de un chorro de sección circular influenciado por el flujo de la boquilla. Herrmann et al. Discute la influencia de la relación de la densidad del gas / líquido en la penetración por chorros de líquido y de las características de ruptura primaria utilizando el método de ajuste de nivel y la fina cuadrícula. Shinjo y Umemura llevaron a cabo una simulación numérica detallada de chorros de líquido en rectas de combustible diesel. Como resultado, fueron capaces de caracterizar la generación del ligamento y el desarrollo de la inestabilidad de la superficie sobre el núcleo del chorro del líquido influenciado por la aerodinámica. Siamas et al. Investigo la inestabilidad de la superficie y de campo de flujo de un chorro anular de remolino con el método VOF, pero la simulación sólo se centra en la región cerca de la salida de la boquilla. Utilizando una computadora de alto rendimiento y con la resolución de la rejilla fina, se puede capturar correctamente el proceso de formación de ligamentos y de las gotas que es difícil de observar durante el experimento, lo que permite un estudio detallado del mecanismo de atomización de líquidos.

3. Pesarse cada sección en una balanza. Tomar la balanza electrónica y pesarse los gramos de agua que contiene cada sección, en las pruebas realizadas a las dos boquillas.

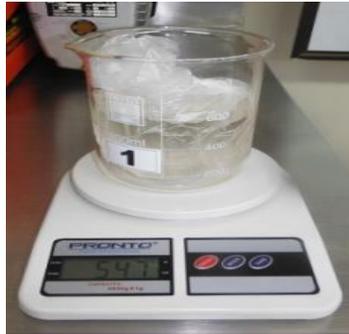
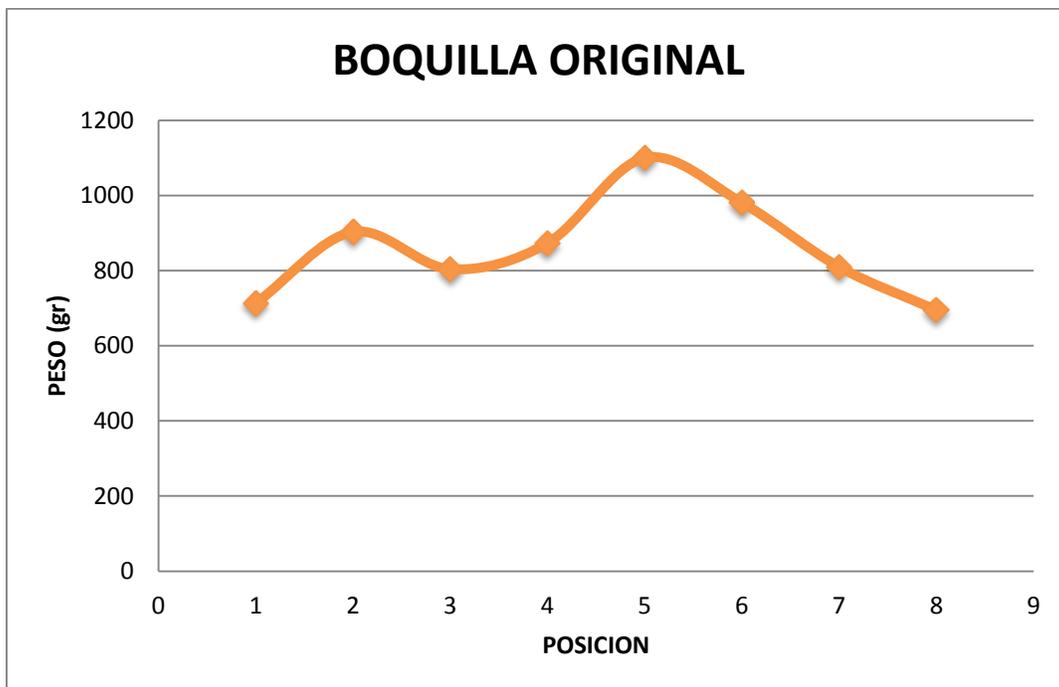
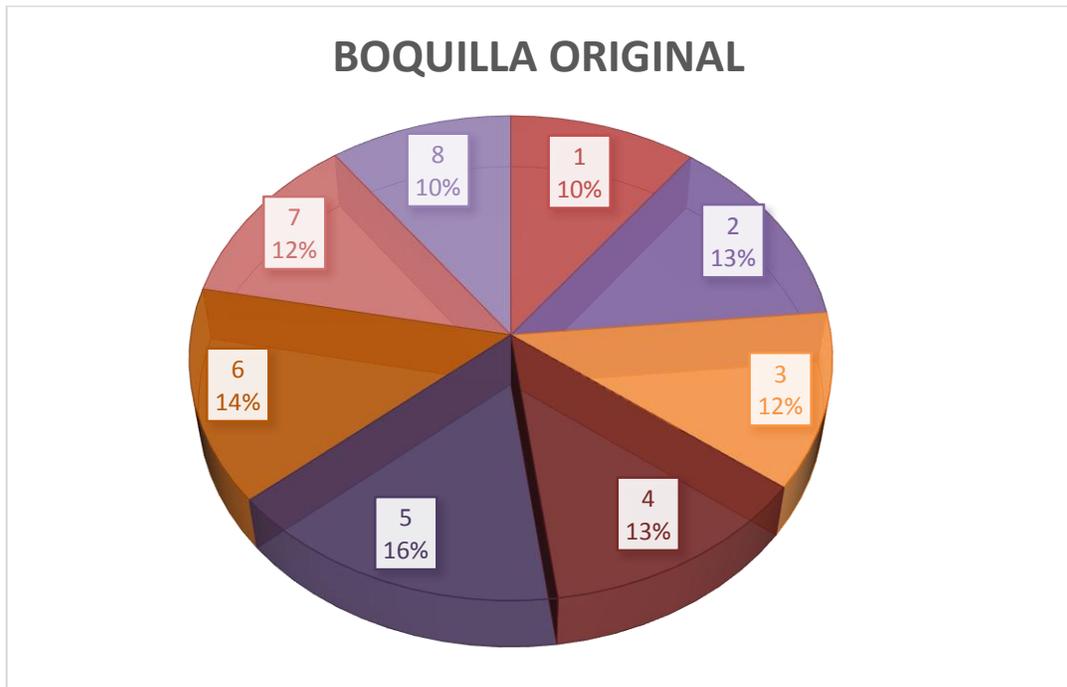


Figura 24. Pesaje para la boquilla original. Fuente propia



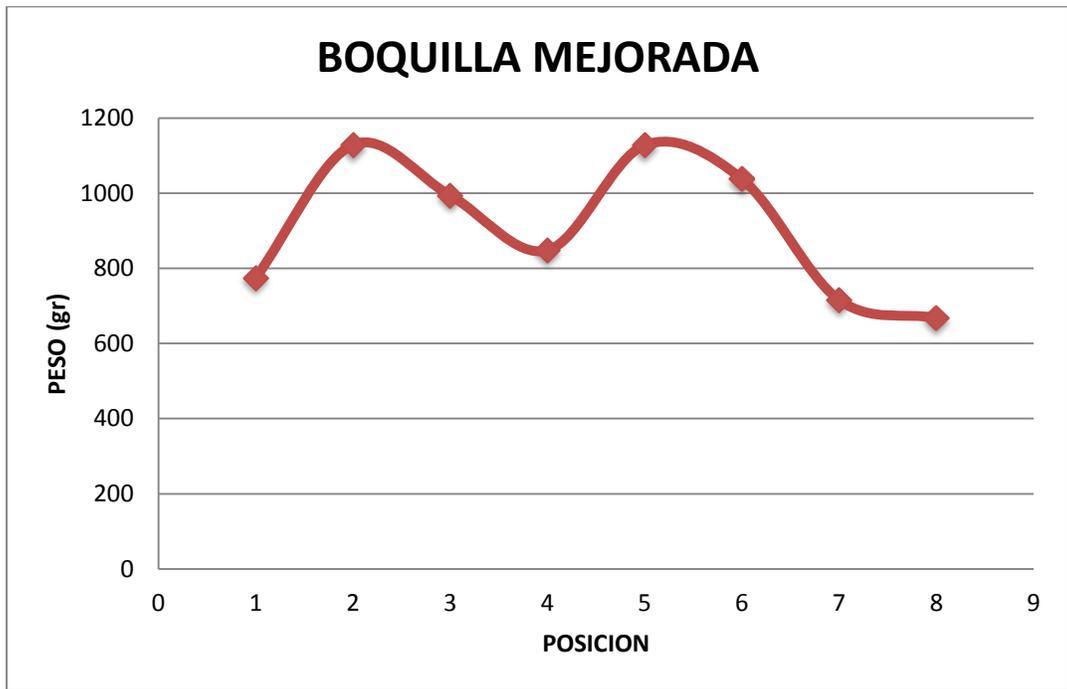
Grafica 1. Gráfico de líneas de la distribución de boquilla original. Fuente propia



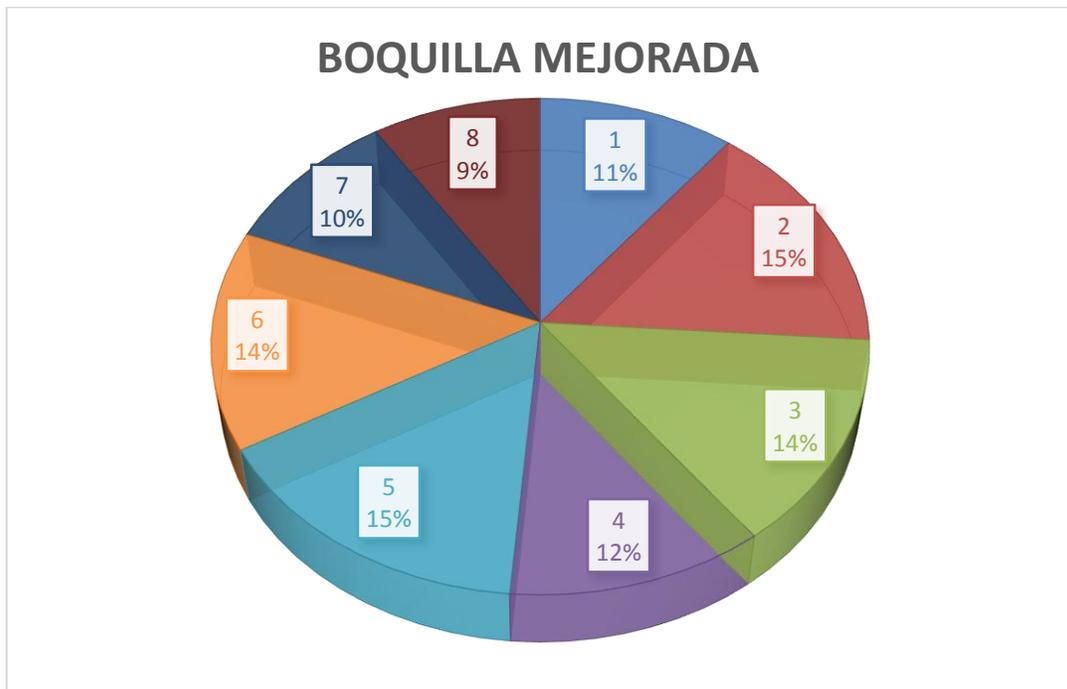
Grafica 2. Gráfico de curva de la distribución de boquilla original. Fuente propia



Figura 25. Pesaje boquilla mejorada. Fuente propia



Grafica 3. Gráfico de líneas de la distribución de boquilla mejorada. Fuente propia



Grafica 4. Gráfico de curva de la distribución de boquilla mejorada. Fuente propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gracias al pesaje del agua contenida en cada una de las secciones de la circunferencia se determina que efectivamente se da una concentración del líquido mayor en la sección 6 del cono, en la tabla 2 y tabla 4 se muestra la entrada de la boquilla ubicada paralelamente a la posición 1, así como también se ubica en la parte experimental (ver figura 23).

Esta prueba se hace porque en la simulación se ve más distribuida el agua hacia un lado como efectivamente sucede.

Hipótesis: Se produce esta distribución debido a la fuerza centrífuga que se da en el interior de la boquilla (sería un trabajo completo hacer un estudio de física que explique el fenómeno).

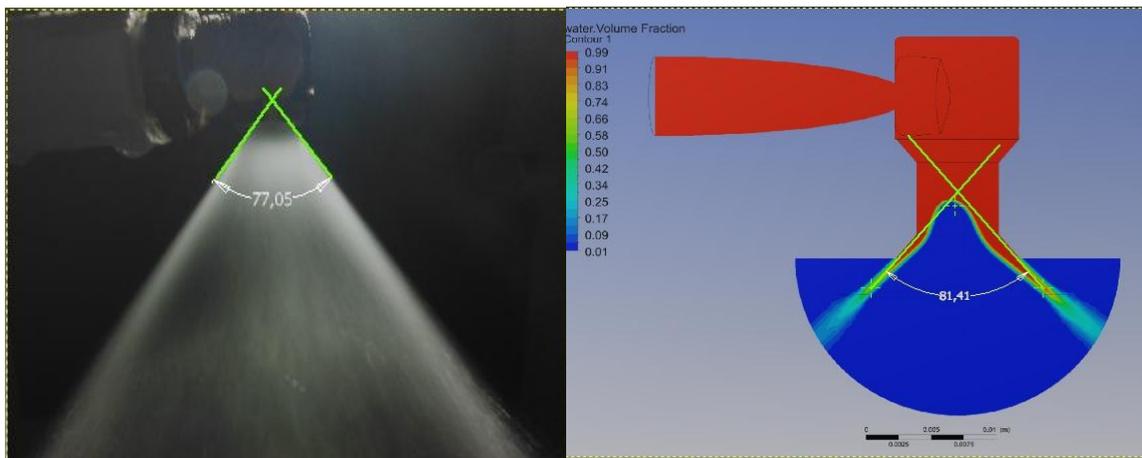


Figura 26. Vista lateral de la boquilla original vs simulación CFD a 10 psi.

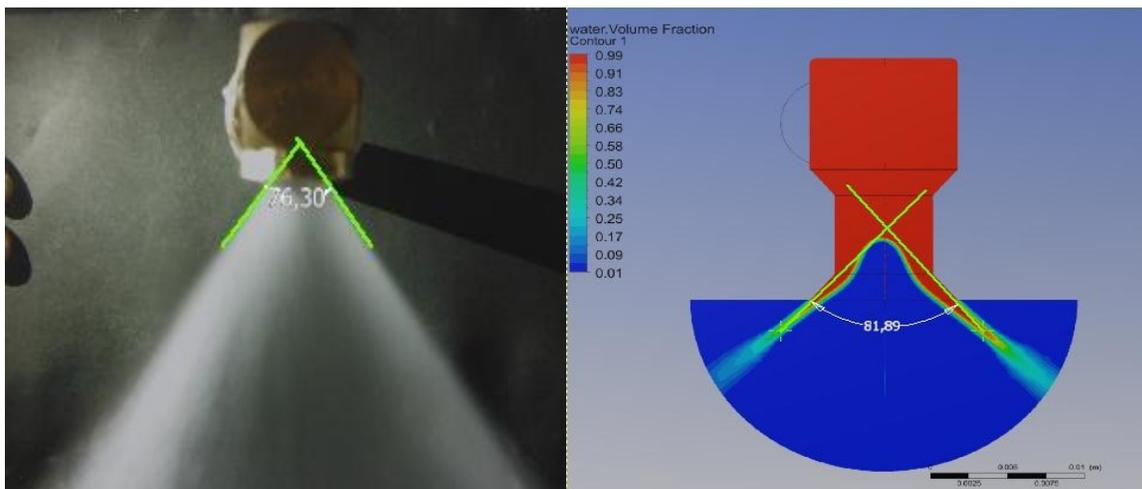


Figura 27. Vista frontal de la boquilla original vs simulación CFD a 10 psi.

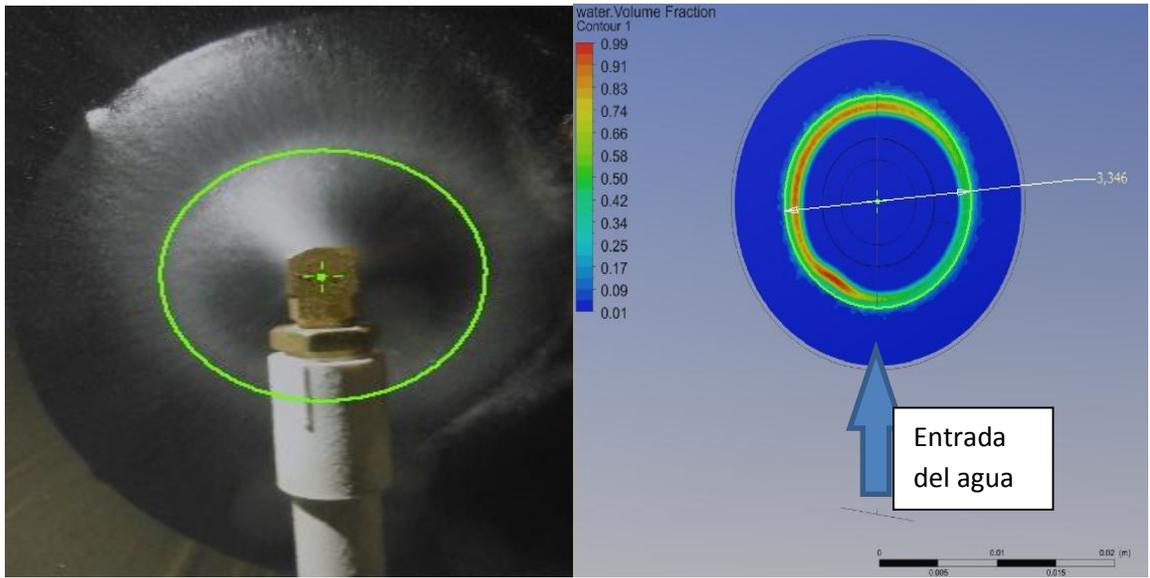


Figura 28. Vista superior de la boquilla original vs simulación CFD a 10 psi.

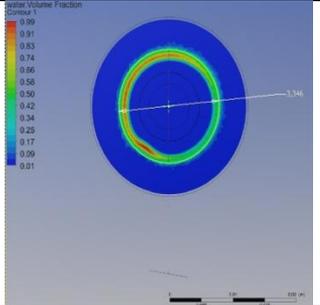
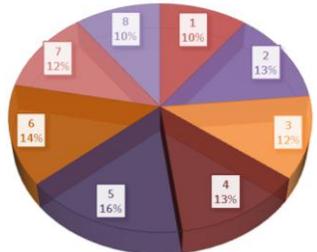
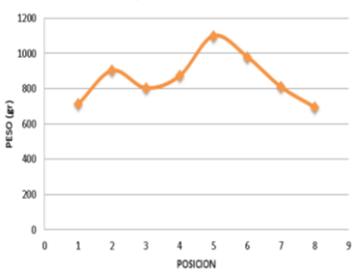
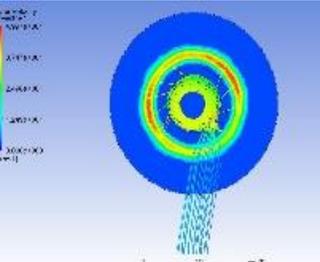
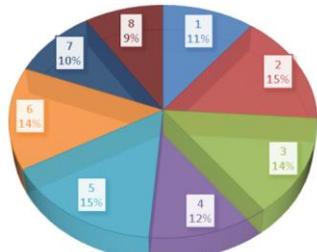
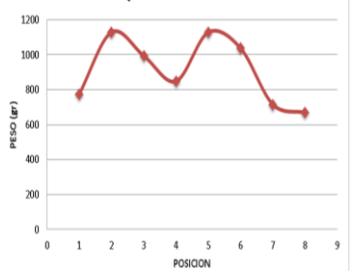
	Imagen de Simulación	Imagen de gráfico de curvas	Imagen de gráfico de líneas																																				
Boquilla Original 80°		<p style="text-align: center;">BOQUILLA ORIGINAL</p>  <table border="1"> <caption>Weight Distribution - Original Nozzle</caption> <thead> <tr><th>Posición</th><th>Porcentaje</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>10%</td></tr> <tr><td>2</td><td>13%</td></tr> <tr><td>3</td><td>12%</td></tr> <tr><td>4</td><td>13%</td></tr> <tr><td>5</td><td>16%</td></tr> <tr><td>6</td><td>14%</td></tr> <tr><td>7</td><td>12%</td></tr> <tr><td>8</td><td>10%</td></tr> </tbody> </table>	Posición	Porcentaje	1	10%	2	13%	3	12%	4	13%	5	16%	6	14%	7	12%	8	10%	<p style="text-align: center;">BOQUILLA ORIGINAL</p>  <table border="1"> <caption>Weight vs Position - Original Nozzle</caption> <thead> <tr><th>Posición</th><th>Peso (lb)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>700</td></tr> <tr><td>2</td><td>900</td></tr> <tr><td>3</td><td>800</td></tr> <tr><td>4</td><td>850</td></tr> <tr><td>5</td><td>1100</td></tr> <tr><td>6</td><td>950</td></tr> <tr><td>7</td><td>800</td></tr> <tr><td>8</td><td>700</td></tr> </tbody> </table>	Posición	Peso (lb)	1	700	2	900	3	800	4	850	5	1100	6	950	7	800	8	700
Posición	Porcentaje																																						
1	10%																																						
2	13%																																						
3	12%																																						
4	13%																																						
5	16%																																						
6	14%																																						
7	12%																																						
8	10%																																						
Posición	Peso (lb)																																						
1	700																																						
2	900																																						
3	800																																						
4	850																																						
5	1100																																						
6	950																																						
7	800																																						
8	700																																						
Boquilla mejorada		<p style="text-align: center;">BOQUILLA MEJORADA</p>  <table border="1"> <caption>Weight Distribution - Improved Nozzle</caption> <thead> <tr><th>Posición</th><th>Porcentaje</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>11%</td></tr> <tr><td>2</td><td>15%</td></tr> <tr><td>3</td><td>14%</td></tr> <tr><td>4</td><td>12%</td></tr> <tr><td>5</td><td>15%</td></tr> <tr><td>6</td><td>14%</td></tr> <tr><td>7</td><td>10%</td></tr> <tr><td>8</td><td>9%</td></tr> </tbody> </table>	Posición	Porcentaje	1	11%	2	15%	3	14%	4	12%	5	15%	6	14%	7	10%	8	9%	<p style="text-align: center;">BOQUILLA MEJORADA</p>  <table border="1"> <caption>Weight vs Position - Improved Nozzle</caption> <thead> <tr><th>Posición</th><th>Peso (lb)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>750</td></tr> <tr><td>2</td><td>1150</td></tr> <tr><td>3</td><td>950</td></tr> <tr><td>4</td><td>850</td></tr> <tr><td>5</td><td>1150</td></tr> <tr><td>6</td><td>1050</td></tr> <tr><td>7</td><td>700</td></tr> <tr><td>8</td><td>700</td></tr> </tbody> </table>	Posición	Peso (lb)	1	750	2	1150	3	950	4	850	5	1150	6	1050	7	700	8	700
Posición	Porcentaje																																						
1	11%																																						
2	15%																																						
3	14%																																						
4	12%																																						
5	15%																																						
6	14%																																						
7	10%																																						
8	9%																																						
Posición	Peso (lb)																																						
1	750																																						
2	1150																																						
3	950																																						
4	850																																						
5	1150																																						
6	1050																																						
7	700																																						
8	700																																						

Tabla 5. Validación de la distribución, Simulación vs experimentación

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Mediante las pruebas experimentales se corroboran las imágenes obtenidas en la simulación CFD, que muestran una mayor cantidad de agua en un sector del cono, los resultados obtenidos en la tabla anterior nos da la certeza que el comportamiento observado en la simulaciones valido.

Fase IV-Optimización

El proyecto parte validando el funcionamiento de la boquilla con respecto al catálogo del fabricante, se han introducido cambios en la geometría a través del programa Ansys, que han permitido conservar las mismas presiones y consumo promedio de agua, además se logra, con el modelo optimizado obtener una mayor cobertura en el spray.

La boquilla inicialmente tiene una configuración del distribuidor con paredes rectas en la salida del agua con un ángulo de inclinación entre estas de 80° lo que genera que el chorro en la aspersión copia este ángulo en la apertura del cono hueco.

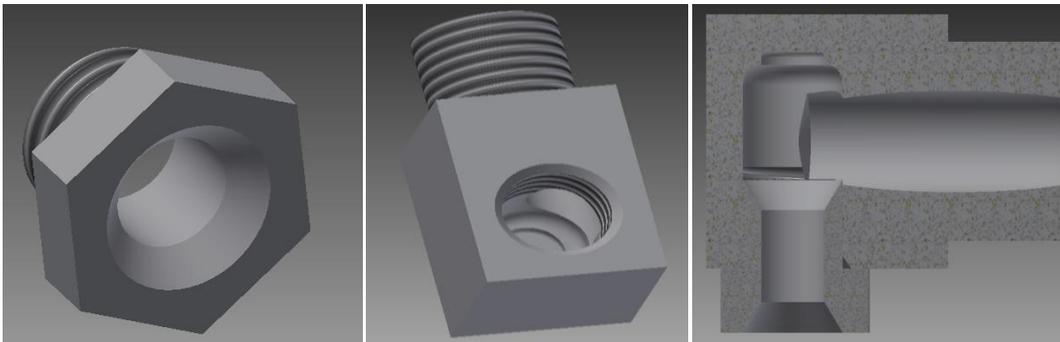


Figura 29. Geometría de boquilla WT 400 80 marca BETE. Fuente propia

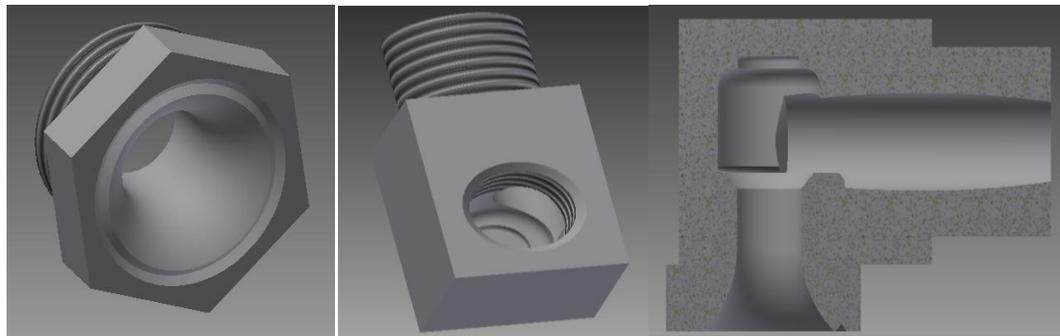


Figura 30. Geometría de la boquilla optimizada. Fuente propia

Buscando mejorar la aspersión de agua en esta boquilla se optó por ampliar el ángulo de inclinación de las paredes de salida de la boquilla, encontrando que siguiendo un patrón cónico en las paredes da mejor resultado que las paredes rectas y el agua tiende incluso a desplazarse por la cara de la tuerca; lo que inicialmente fue una situación problema, ya que la arista de esta tuerca no dejaba generar un patrón circular en el chorro

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de aspersión, esto se solucionó haciéndole un rompe goteras en el sitio exacto donde la pared cónica tocaba la cara externa de la tuerca. La entrada y la cámara donde se genera el giro tangencial de atomización del agua no se modificaron.

Fase V-Fabricación

La fabricación se realiza retomando los datos aportados por la simulación en Ansys y se trasladan a Mastercam, software que permite hacer el proceso de forma eficiente.

Se fabrica el modelo que presenta mejor comportamiento en la fase IV y se realiza una comparación numérico-experimental final entre el modelo optimizado y el modelo existente.

Procedimiento de fabricación

Información previa disponible: Con el plano se obtiene la información geométrica y tecnológica: Formas, contornos, tolerancias, acabado superficial, material, número de piezas a mecanizar, cambio manual o automático de pieza y/o herramienta, herramientas a utilizar, etc.

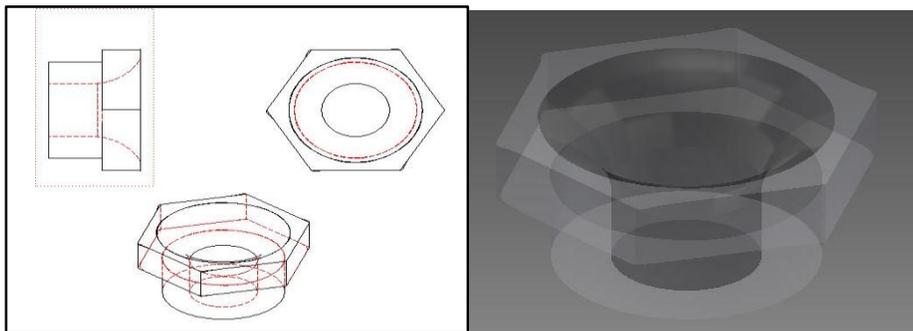


Figura 31. Planos isométricos del distribuidor de la boquilla

Selección del plan de trabajo: Secuencia de operaciones, utillajes, selección de herramientas, selección de avances y velocidades de corte.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

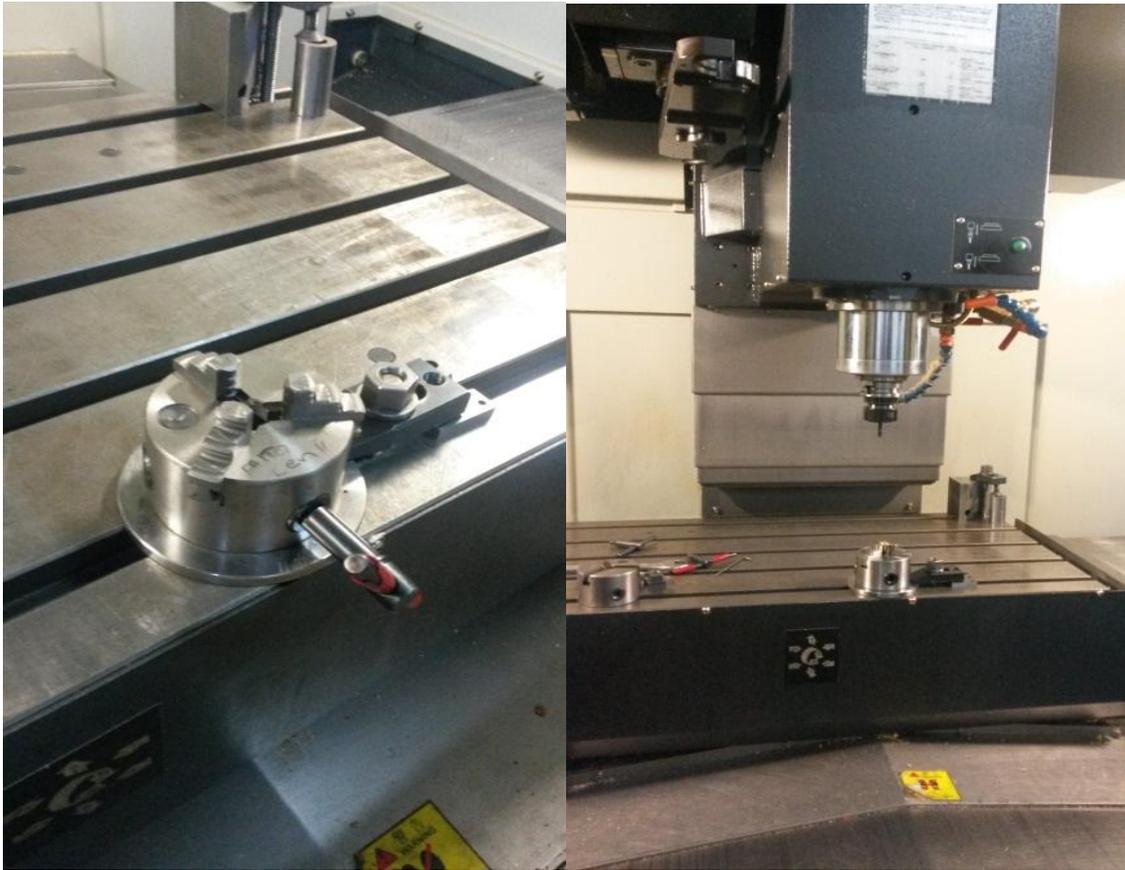


Figura 32. Operaciones, utillajes y selección de herramientas. Fuente propia CNC

Programación para la operación en la maquina seleccionada

El estudio geométrico nos permite determinar las coordenadas de puntos particulares de la pieza necesarios para la programación

La programación se realiza en MASTERCAM: Se realiza la programación y se genera el código G

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

%
(O1 MECANIZADO CONO)
(MATERIAL - LATON)
( T19 | | H19 )
(FRESA ESFERICA DE 6.0MM)
G21
G0 G17 G40 G49 G80 G90
T19 M6
G0 G90 G54 X5.706 Y0. A0. S5500 M3
M8
G43 H19 Z2.
G1 Z-.237 F50.
G3 X0. Y5.706 I-5.706 J0. F1200.
X-5.706 Y0. I0. J-5.706
X0. Y-5.706 I5.706 J0.
X5.706 Y0. I0. J5.706
G1 X5.614
Z-.277 F50.
G3 X0. Y5.614 I-5.614 J0. F1200.
X-5.614 Y0. I0. J-5.614
X0. Y-5.614 I5.614 J0.
X5.614 Y0. I0. J5.614
G1 X5.522
Z-.317 F50.
G3 X0. Y5.522 I-5.522 J0. F1200.
X-5.522 Y0. I0. J-5.522
X0. Y-5.522 I5.522 J0.
X5.522 Y0. I0. J5.522
G1 X5.431
Z-.359 F50.
G3 X0. Y5.431 I-5.431 J0. F1200.
X-5.431 Y0. I0. J-5.431
X0. Y-5.431 I5.431 J0.
X5.431 Y0. I0. J5.431
G1 X5.341
Z-.402 F50.
G3 X0. Y5.341 I-5.341 J0. F1200.
X-5.341 Y0. I0. J-5.341
X0. Y-5.341 I5.341 J0.
X5.341 Y0. I0. J5.341
G1 X5.251
Z-.446 F50.
G3 X0. Y5.251 I-5.251 J0. F1200.
X-5.251 Y0. I0. J-5.251
X0. Y-5.251 I5.251 J0.
X5.251 Y0. I0. J5.251
G1 X5.161
Z-.49 F50.
G3 X0. Y5.161 I-5.161 J0. F1200.
X-5.161 Y0. I0. J-5.161
X0. Y-5.161 I5.161 J0.
X5.161 Y0. I0. J5.161
G1 X5.073
Z-.536 F50.
G3 X0. Y5.073 I-5.073 J0. F1200.
X-5.073 Y0. I0. J-5.073
X0. Y-5.073 I5.073 J0.
X5.073 Y0. I0. J5.073
G1 X4.984
Z-.583 F50.
G3 X0. Y4.984 I-4.984 J0. F1200.
X-4.984 Y0. I0. J-4.984
X0. Y-4.984 I4.984 J0.
X4.984 Y0. I0. J4.984
G1 X4.896
Z-.631 F50.
G3 X0. Y4.896 I-4.896 J0. F1200.
X-4.896 Y0. I0. J-4.896
X0. Y-4.896 I4.896 J0.
X4.896 Y0. I0. J4.896
G1 X4.809
Z-.68 F50.
G3 X0. Y4.809 I-4.809 J0. F1200.
X-4.809 Y0. I0. J-4.809
X0. Y-4.809 I4.809 J0.
X4.809 Y0. I0. J4.809
G1 X4.722
Z-.73 F50.
G3 X0. Y4.722 I-4.722 J0. F1200.
X-4.722 Y0. I0. J-4.722
X0. Y-4.722 I4.722 J0.
X4.722 Y0. I0. J4.722
G1 X4.636
Z-.781 F50.
G3 X0. Y4.636 I-4.636 J0. F1200.
X-4.636 Y0. I0. J-4.636
X0. Y-4.636 I4.636 J0.
X4.636 Y0. I0. J4.636
G1 X4.551
Z-.833 F50.
G3 X0. Y4.551 I-4.551 J0. F1200.
X-4.551 Y0. I0. J-4.551
X0. Y-4.551 I4.551 J0.
X4.551 Y0. I0. J4.551
G1 X4.466
Z-.886 F50.
G3 X0. Y4.466 I-4.466 J0. F1200.
X-4.466 Y0. I0. J-4.466
X0. Y-4.466 I4.466 J0.
X4.466 Y0. I0. J4.466
G1 X4.381
Z-.94 F50.

```

Figura 33. Lenguaje de programación y la generación de los códigos

Selección y ejecución en la máquina

- ✓ **Preparación de máquina:** Se introduce el programa en la memoria de la máquina CNC.
- ✓ **Ejecución:** Colocamos un Bloque de 5/8" (15.8 mm) en material Latón.
- ✓ Se elige una herramienta Broca Centro, se perfora hasta Z=-0.25", con un avance de 70 a 1600 rpm (revoluciones por minuto).
- ✓ Se elige una Broca de 1/4" se perfora hasta Z=-4", con avance de 70 a 1200 rpm (revoluciones por minuto).
- ✓ Se usa una fresa de 1/4", con avance de 0.1 a 3200 rpm (revoluciones por minuto).
- ✓ Se fresa el contorno de 3/8" hasta una profundidad de 3/8".
- ✓ Luego le damos forma de hexágono a la tuerca.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- ✓ Por último utilizamos una fresa en T de 3/16" con avance de 0.1 a 3200 rpm (revoluciones por minuto).
- ✓ Para la rosca externa, podemos utilizar una tarraja de 3/8" para rosca NC.

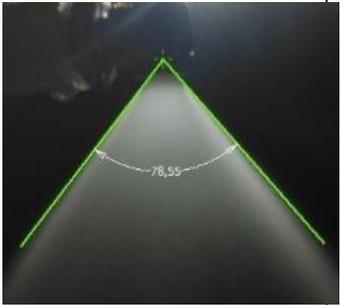
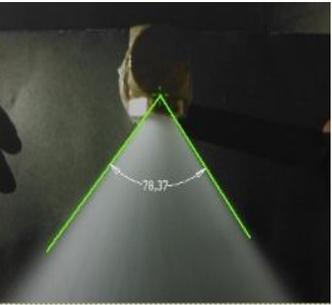
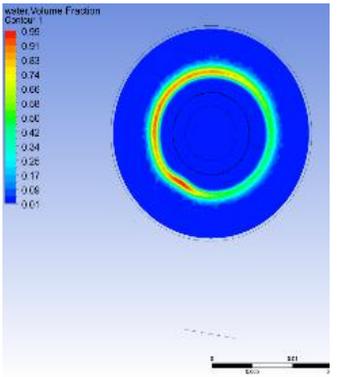
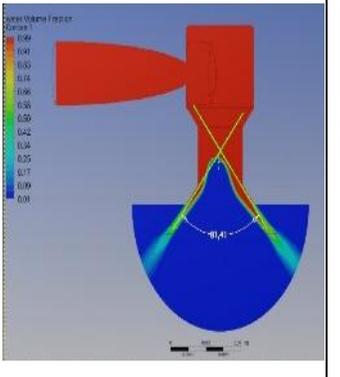
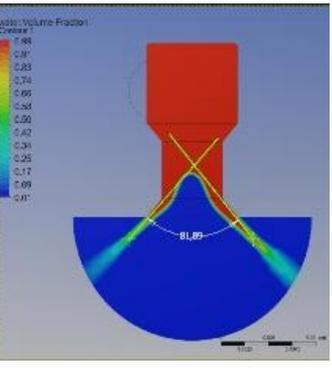


Figura 124. Ejecución de la boquilla con su forma terminada

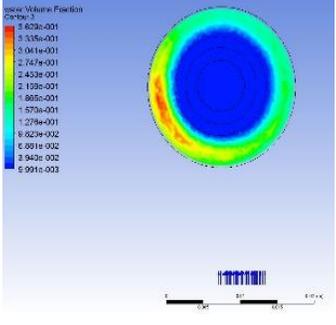
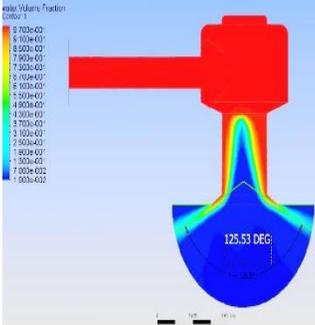
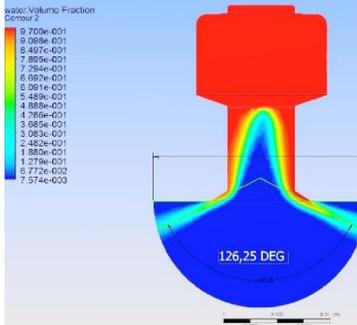
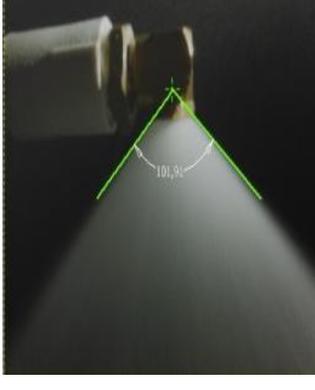
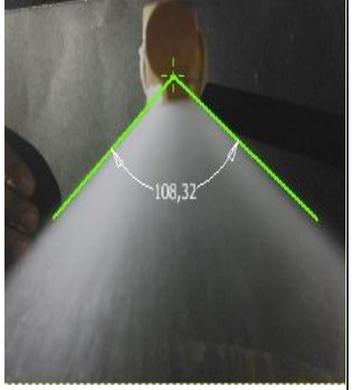


Figura 135. Boquilla con su forma terminada para utilizarla

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

Configuración.	Condiciones de operación.	Vista plano superior.	Vista plano lateral.	Vista plano frontal.
Experimental Boquilla original 80°	0.22 Kg/s 30 PSI			
Simulación boquilla original 80°	0.22 Kg/s 30 PSI			

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Experimental Boquilla recta original 120°		No se presentan resultados experimentales para esta geometría debido a que los resultados computacionales no mostraron mejora alguna respecto a la geometría comercial.		
Simulación boquilla recta original 120°	0.22 Kg/s 30 PSI			
Experimental Boquilla curva mejorada	0.22 Kg/s 30 PSI			

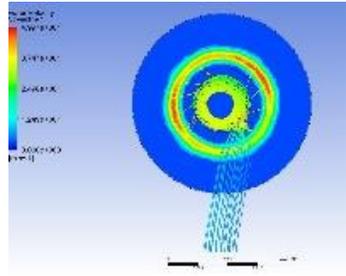
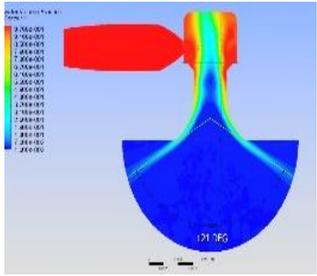
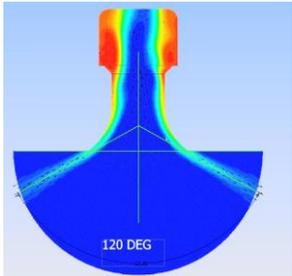
Simulación Boquilla curva mejorada	0.22 Kg/s 30 PSI			
---	-----------------------------	---	--	---

Tabla 6. Resultados experimentales vs simulación fuente propia

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Discusión:

- Los métodos de ingeniería inversa y los procedimientos CAE son útiles para la interpretación de objetos, permitiendo tanto comprenderlos como modificarlos y se convierten en herramientas indispensables para adquirir conocimientos en ingeniería inversa en la época actual.
- Tanto la simulación como la experimentación han permitido analizar el comportamiento de las boquillas de cono hueco en su funcionamiento fluido dinámico permitiendo la elección de la boquilla que se desempeñó más adecuadamente
- La boquilla mejorada presenta un mayor ángulo de aspersión del cono en ambas presiones estudiadas. Se han introducido cambios en la geometría a través del programa Ansys, que han permitido conservar las mismas presiones y consumo promedio de agua, además se logra, con el modelo mejorado obtener una mayor cobertura en el spray.
- No se dispone en el laboratorio de herramientas confiables que permitan establecer con certeza cuál es la distribución en cada punto de los 360° del cono, por esto se ha fabricado el dispositivo que aparece en la prueba de distribución. Por otras investigaciones se ha descubierto que un dispositivo de estos no es suficiente, como es el caso de Bade, Kalata, y Schick (2010), quienes en su investigación han utilizado un escáner de precisión y un túnel de viento que les ha permitido comprender con certeza cuál es el tamaño de la gota que se produce en determinada boquilla a diferentes presiones. También es el caso de Jia et al (2016), quienes utilizan un escáner y una cámara conectada una computadora de alta resolución para hacer de manera digital el recuento final de partículas.
- Las boquillas de cono hueco copian la geometría que se ponga en el distribuidor en la salida del agua, por tanto, el ángulo de aspersión es constante a cualquier presión. Lo que varía es el flujo másico: a mayor presión, mayor flujo másico. La primera boquilla presenta la misma tendencia de 80 grados a ambas presiones tal como lo afirma el fabricante.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

- Se digitalizo las piezas del aspersor correctamente. Debido a la no complejidad de su geometría se levantaron los planos y modelos CAD, mediante el software Ansys e inventor.
- Se modificaron variables geométricas para buscar un mejor comportamiento del fluido, tomando como punto de comparación la boquilla inicial y para proceder a fabricar la boquilla mejorada.
- Por medio de la ingeniería inversa se pudo encontrar la curvatura de la boquilla mejorada.
- Se realizaron simulaciones en las que se observaron las fracciones volumétricas para identificar el comportamiento del fluido.
- Se encontró que las simulaciones y las experimentaciones no son exactas, sin embargo existen incertidumbres y errores en la recolección y toma de datos pero los resultados son cercanos y aceptables.
- La simulación nos ayudó a analizar el comportamiento de la boquilla que debería ser fabricada y que geometría no tenía comportamiento adecuado como se muestra en la tabla xx, donde el perfil de la aspersión se encuentra muy concentrado en un punto y tiene espacios vacíos y debido a los resultados obtenidos en la simulación no se fabricó la boquilla.

Recomendaciones

Continuar con la realización de estudios a la boquilla de cono hueco, son necesarias en diferentes industrias y requieren altos costos de importación.

Hacer uso de la metodología de ingeniería inversa a través de todo el proceso de formación de ingenieros, ésta permite un nuevo acercamiento al saber.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Trabajo futuro

Retomar la información aportada en este trabajo para hacer un estudio a fondo de las boquillas de cono hueco con usos específicos dentro de la industria, como la agrícola (sistemas de roció, fumigación), la química (reactores nucleares, control de temperatura), y hasta para los planes de emergencia, automotriz (inyectores de los motores de combustión, lavadores de gases).

Además se sugiere estudiar estas boquillas a varias presiones para comprender mejor su funcionamiento tanto física como virtualmente, determinar la distancia a la cual colapsa el cono y se pulveriza el agua.

Se sugiere hacer otros estudios de CFD a través de Ansys para medir variables como el calor, el aire, y el comportamiento de líquidos con diferente densidad a la del agua, ya que el banco de pruebas del ITM cuenta con una bomba de calor, éstos pueden ser de utilidad tanto para la ciencia como para la industria.

Realizar un estudio de física en dinámica de fluidos que permita determinar el fenómeno por el que la distribución del agua se concentra en alguna sección del cono.

Adquirir instrumentos que permitan registrar el comportamiento del agua en las pruebas del laboratorio del ITM como lo hacen (G. A. Siamas, 2009) que toman evidencias de las pruebas realizadas a los fluidos. Escáner de precisión y computadora dotada con cámara de alta resolución que ayuden a determinar con certeza cuánta agua circula y de qué modo a través de la boquilla en la realización de pruebas físicas de distribución y en lo posible identificar el tamaño de la gota.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

A. Belhadef, A. V. (2012). Pressure-swirl atomization: Modeling and experimental approaches. *International Journal of Multiphase Flow* 39 , 13-20.

A. Tratnig, G. B. (2010). Drop size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers. *International Journal of Multiphase Flow* 36 , 349–363.

Acodinsa. (10 de septiembre de 2015). *Boquillas de aspersion*. Obtenido de <http://www.acodinsa.co/boquillas.html>

Acosta Ramos, D. A. (2013). Uso de la ingeniería inversa como metodología de enseñanza en la formación para la innovación. *WEF* (pág. 7). Cartagena de Indias: World Engineering Education Forum.

Ahmad, H., Abdul, H., Rahim, H., Mohd, H., Mohd, M., & Helmi, R. (2011). *Spray cone angle and air core diameter of hollow cone swirl rocket injector*. Recuperado el 20 de junio de 2016, de <http://journals.iium.edu.my/ejournal/index.php/iiumej/article/view/66/170>

ANSYS. (2016). *ANSYS CFD*. Obtenido de <http://www.ansys.com/es-ES/Products/Fluids/ANSYS-CFD>

ANSYS. (2016). *CFX*. Recuperado el 15 de 05 de 2016, de <http://www.ansys.com/es-ES/Products/Fluids/ANSYS-CFX>

ANSYS. (2016). *Fluent*. Recuperado el 15 de 05 de 2016, de <http://www.ansys.com/es-ES/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>

ANSYS. (2016). *Productos*. Recuperado el 15 de 05 de 2016, de <http://www.ansys.com/es-ES/Products>

Artec 3D. (2016). *Artec Spider*. Recuperado el 15 de 05 de 2016, de <https://www.artec3d.com/es/hardware/artec-spider>

Artec 3D scanners. (s.f.). *Artec Spider*. Obtenido de <http://www.artec3d.com/es/hardware/artec-spider/>

Bade, K. M., Kalata, W., & Schick, R. J. (2010). *Experimental and Computational Study of a Spray at Multiple Injection Angles*. Recuperado el 18 de 05 de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/268400237_Experimental_and_Computational_Study_of_a_Spray_at_Multiple_Injection_Angles

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Barazal, C. A., Flores, I., & Sala, J. M. (2001). *Interés y posibilidades de la Dinámica de Fluidos Computacional*. Obtenido de

<http://www.casbil.com/documentacion/Technical%20Articles/INTERESCFD.pdf>

BETE. (s.f.). *WT*. Recuperado el 29 de junio de 2016, de

<http://nebula.wsimg.com/73934b278b96a5849ad620644990aba7?AccessKeyId=E14D0BEC90D9F66B5FC4&disposition=0&alloworigin=1>

Bilalis, N. (2000). *Computer Aided Design CAD*. Obtenido de

http://www.adi.pt/docs/innoregio_cad-en.pdf

CAADDY. (s.f.). *Escaneado 3D para la ingeniería inversa*. Recuperado el 13 de 05 de 2016, de

<http://www.caddyspain.com/aplicaciones-del-escaneado-3d/escaneado-3d-para-la-ingenieria-inversa/>

Del Coz Díaz, J. J., & Suárez Domínguez, F. J. (2011). *Universidad de Oviedo*. Obtenido de

www.construccion.uniovi.es

Ding, J.-W., Li, G.-X., Yu, Y.-S., & Li, H.-M. (2016). *Numerical Investigation on Primary Atomization Mechanism of Hollow Cone Swirling Sprays*. Recuperado el 21 de 06 de 2016, de

<http://www.hindawi.com/journals/ijrm/2016/1201497/>

Gómez Franco, J. J., & García, A. R. (2015). *Desarrollo de guía para el procedimiento de escaneo con el equipo Artec 3D Spider®*. Medellín: ITM.

González Castellanos, R., Lavín, M., & Curiel Lorenzo, L. (diciembre de 2003). *Metodología de la Investigación científica para las ciencias técnicas*. Obtenido de Universidad de Matanzas:

<http://monografias.umcc.cu/monos/2003/Monografia%20Met.%20Inv.%20Cientifica%20CT%20Segunda%20parte.pdf>

ITM. Facultad de ingenierías. (s.f.). *Laboratorios de investigación (Parque i)*. Obtenido de

<http://www.itm.edu.co/PlantillaMicrositio/ingenieria/materialesavanzadosyenergia.aspx>

Jia-Wei Ding, G.-X. L.-S.-M. (2016). *Numerical Investigation on Primary Atomization Mechanism of Hollow Cone Swirling Sprays*. Recuperado el 07 de 07 de 2016, de

<http://www.hindawi.com/journals/ijrm/2016/1201497/>

Made in China.com. (2015). *Boquilla de cono hueco*. Obtenido de http://es.made-in-china.com/tag_search_product/Hollow-Cone-Nozzle_guuhern_1.html

Mathews, G. A., & Thronhill, E. (1996). Equipo Portátil de Aplicación de Pesticidas para Uso en Agricultura. En O. D. Alimentación., *Boletín de servicios agrícolas de la FAO* (pág. 24). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Nonnenmacher, S., & Piesche, M. (2000). Design of hollow cone pressure swirl nozzles to atomize Newtonian fluids. *Chemical Engineering Science* 55 , 4339-4348.

Ojados González, D. (2010). *Ingeniería inversa*. Recuperado el 13 de 05 de 2016, de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1455/vertice1.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Ojados, D. (s.f.). *Prototipado rápido y digitalización 3D*. Recuperado el 13 de 05 de 2016, de <http://www.upct.es/sait/sedic/prototipado.html>

Parisi-Amón, G., & Lynn Murphey, C. (2016). *Full steam ahead*. Recuperado el 14 de 05 de 2016, de <http://resource.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/article/Full-Steam-Ahead-AA-V10-11.pdf>

Riascos, J. A., Hincapié, D. A., & Ardila, J. G. (2015). *Potencial de los laboratorios del ITM en el análisis CFD para la innovación en ingeniería*. Obtenido de <http://www.umariana.edu.co/ojs-editorial/index.php/libroeditorialunimar/article/view/636>

Universidad de Zaragoza. (Diciembre de 2010). *Fabricación Integrada por Ordenador. Curso preparatorio*. Obtenido de http://ocw.unizar.es/ocw/pluginfile.php/233/mod_label/intro/fio_6_sistemas_cad_cam_ii.pdf

University of Birmingham Intranet. (s.f.). *Ansys CFD Products v16.1*. Obtenido de <https://intranet.birmingham.ac.uk/it/teams/infrastructure/research/bear/bluebear/applications/ansyscfv16-1.aspx>

Wang, J., Gu, D., Yu, Z., Tan, C., & Zhou, L. (Diciembre 2012). A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering. *Computers & Industrial Engineering, Volume 63, Issue 4* , Pages 1189-1200.

Wikipedia, La enciclopedia libre. (2015). *Ingeniería inversa. (2015, 22 de agosto)*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre.: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ingenier%C3%ADa_inversa&oldid=84586089.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Especificaciones de la boquilla inicial

El paso inicial para la ejecución de este proyecto ha sido conseguir la boquilla de cono hueco. Después de mirar diferentes opciones, precios, rendimiento, se toma la decisión de iniciar el proceso con una boquilla de marca comercial, que ha sido conseguida en la distribuidora Acodinsa, con un ángulo de aspersión en catálogo de 80°.

Estas boquillas, se encuentran disponibles dentro de las siguientes Características de acuerdo a la información aportada por el fabricante:

Referencia BETE WT

Patrón de aspersión: Cono Hueco

Ángulos de Aspersión entre 70° a 120°

Velocidades de flujo entre 0,04 a 38,0 Gpm

Ángulo recto/ Cono hueco

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

- Diseño convencional utilizando Método torbellino de atomización Tangencial
- Se usa donde se requiere un patrón circular o en grandes superficies con múltiples instalaciones donde existe una considerable superposición de aerosoles
- Conexiones disponibles macho y hembra
- fabricadas en diferentes materiales: acero inoxidable, PVC, latón entre otros (BETE, WT)

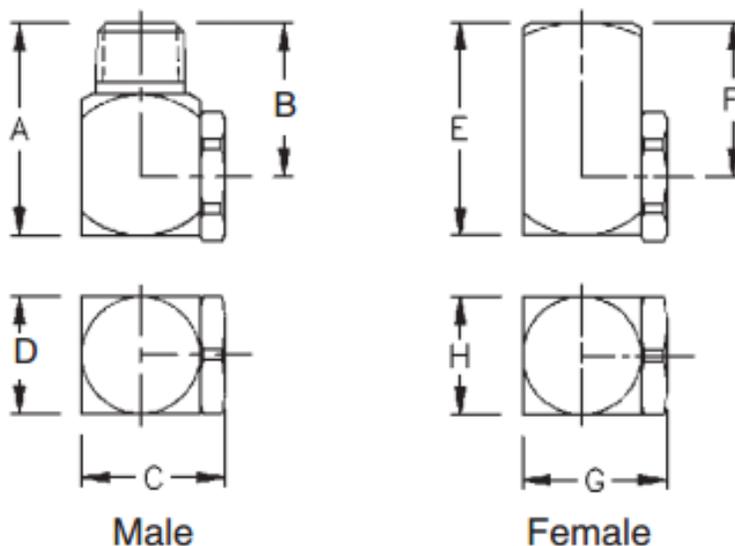


Figura 8. Diseño de la boquilla (BETE, WT)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La referencia adquirida posee las siguientes GENERALIDADES:

Boquilla de cono hueco con conexión macho

Material: Bronce (latón)

Referencia: BETE WT 400 80

Ángulo de aspersion: 80°

Comprada a la empresa Acodinsa por un valor de: \$62.000

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE B: Códigos para realizar la boquilla en la máquina

%
(01 MECANIZADO CONO)
(MATERIAL - LATON)
(T19 || H19)
(FRESA ESFERICA DE 6.0MM)
G21
G0 G17 G40 G49 G80 G90
T19 M6
G0 G90 G54 X5.706 Y0. A0. S5500 M3
M8
G43 H19 Z2.
G1 Z-.237 F50.
G3 X0. Y5.706 I-5.706 J0. F1200.
X-5.706 Y0. I0. J-5.706
X0. Y-5.706 I5.706 J0.
X5.706 Y0. I0. J5.706
G1 X5.614
Z-.277 F50.
G3 X0. Y5.614 I-5.614 J0. F1200.
X-5.614 Y0. I0. J-5.614
X0. Y-5.614 I5.614 J0.
X5.614 Y0. I0. J5.614
G1 X5.522
Z-.317 F50.
G3 X0. Y5.522 I-5.522 J0. F1200.
X-5.522 Y0. I0. J-5.522
X0. Y-5.522 I5.522 J0.
X5.522 Y0. I0. J5.522
G1 X5.431
Z-.359 F50.
G3 X0. Y5.431 I-5.431 J0. F1200.
X-5.431 Y0. I0. J-5.431
X0. Y-5.431 I5.431 J0.
X5.431 Y0. I0. J5.431
G1 X5.341
Z-.402 F50.
G3 X0. Y5.341 I-5.341 J0. F1200.
X-5.341 Y0. I0. J-5.341
X0. Y-5.341 I5.341 J0.
X5.341 Y0. I0. J5.341
G1 X5.251
Z-.446 F50.
G3 X0. Y5.251 I-5.251 J0. F1200.
X-5.251 Y0. I0. J-5.251
X0. Y-5.251 I5.251 J0.
X5.251 Y0. I0. J5.251
G1 X5.161
Z-.49 F50.
G3 X0. Y5.161 I-5.161 J0. F1200.
X-5.161 Y0. I0. J-5.161
X0. Y-5.161 I5.161 J0.
X5.161 Y0. I0. J5.161
G1 X5.073
Z-.536 F50.
G3 X0. Y5.073 I-5.073 J0. F1200.
X-5.073 Y0. I0. J-5.073
X0. Y-5.073 I5.073 J0.
X5.073 Y0. I0. J5.073
G1 X4.984
Z-.583 F50.
G3 X0. Y4.984 I-4.984 J0. F1200.
X-4.984 Y0. I0. J-4.984
X0. Y-4.984 I4.984 J0.

X4.984 Y0. I0. J4.984
G1 X4.896
Z-.631 F50.
G3 X0. Y4.896 I-4.896 J0. F1200.
X-4.896 Y0. I0. J-4.896
X0. Y-4.896 I4.896 J0.
X4.896 Y0. I0. J4.896
G1 X4.809
Z-.68 F50.
G3 X0. Y4.809 I-4.809 J0. F1200.
X-4.809 Y0. I0. J-4.809
X0. Y-4.809 I4.809 J0.
X4.809 Y0. I0. J4.809
G1 X4.722
Z-.73 F50.
G3 X0. Y4.722 I-4.722 J0. F1200.
X-4.722 Y0. I0. J-4.722
X0. Y-4.722 I4.722 J0.
X4.722 Y0. I0. J4.722
G1 X4.636
Z-.781 F50.
G3 X0. Y4.636 I-4.636 J0. F1200.
X-4.636 Y0. I0. J-4.636
X0. Y-4.636 I4.636 J0.
X4.636 Y0. I0. J4.636
G1 X4.551
Z-.833 F50.
G3 X0. Y4.551 I-4.551 J0. F1200.
X-4.551 Y0. I0. J-4.551
X0. Y-4.551 I4.551 J0.
X4.551 Y0. I0. J4.551
G1 X4.466
Z-.886 F50.
G3 X0. Y4.466 I-4.466 J0. F1200.
X-4.466 Y0. I0. J-4.466
X0. Y-4.466 I4.466 J0.
X4.466 Y0. I0. J4.466
G1 X4.381
Z-.94 F50.
G3 X0. Y4.381 I-4.381 J0. F1200.
X-4.381 Y0. I0. J-4.381
X0. Y-4.381 I4.381 J0.
X4.381 Y0. I0. J4.381
G1 X4.298
Z-.994 F50.
G3 X0. Y4.298 I-4.298 J0. F1200.
X-4.298 Y0. I0. J-4.298
X0. Y-4.298 I4.298 J0.
X4.298 Y0. I0. J4.298
G1 X4.215
Z-1.05 F50.
G3 X0. Y4.215 I-4.215 J0. F1200.
X-4.215 Y0. I0. J-4.215
X0. Y-4.215 I4.215 J0.
X4.215 Y0. I0. J4.215
G1 X4.132
Z-1.107 F50.
G3 X0. Y4.132 I-4.132 J0. F1200.
X-4.132 Y0. I0. J-4.132
X0. Y-4.132 I4.132 J0.
X4.132 Y0. I0. J4.132
G1 X4.051
Z-1.165 F50.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

G3 X0. Y4.051 I-4.051 J0. F1200.
 X-4.051 Y0. IO. J-4.051
 X0. Y-4.051 I4.051 J0.
 X4.051 Y0. IO. J4.051
 G1 X3.97
 Z-1.224 F50.
 G3 X0. Y3.97 I-3.97 J0. F1200.
 X-3.97 Y0. IO. J-3.97
 X0. Y-3.97 I3.97 J0.
 X3.97 Y0. IO. J3.97
 G1 X3.889
 Z-1.283 F50.
 G3 X0. Y3.889 I-3.889 J0. F1200.
 X-3.889 Y0. IO. J-3.889
 X0. Y-3.889 I3.889 J0.
 X3.889 Y0. IO. J3.889
 G1 X3.81
 Z-1.344 F50.
 G3 X0. Y3.81 I-3.81 J0. F1200.
 X-3.81 Y0. IO. J-3.81
 X0. Y-3.81 I3.81 J0.
 X3.81 Y0. IO. J3.81
 G1 X3.731
 Z-1.405 F50.
 G3 X0. Y3.731 I-3.731 J0. F1200.
 X-3.731 Y0. IO. J-3.731
 X0. Y-3.731 I3.731 J0.
 X3.731 Y0. IO. J3.731
 G1 X3.653
 Z-1.468 F50.
 G3 X0. Y3.653 I-3.653 J0. F1200.
 X-3.653 Y0. IO. J-3.653
 X0. Y-3.653 I3.653 J0.
 X3.653 Y0. IO. J3.653
 G1 X3.575
 Z-1.531 F50.
 G3 X0. Y3.575 I-3.575 J0. F1200.
 X-3.575 Y0. IO. J-3.575
 X0. Y-3.575 I3.575 J0.
 X3.575 Y0. IO. J3.575
 G1 X3.498
 Z-1.595 F50.
 G3 X0. Y3.498 I-3.498 J0. F1200.
 X-3.498 Y0. IO. J-3.498
 X0. Y-3.498 I3.498 J0.
 X3.498 Y0. IO. J3.498
 G1 X3.422
 Z-1.661 F50.
 G3 X0. Y3.422 I-3.422 J0. F1200.
 X-3.422 Y0. IO. J-3.422
 X0. Y-3.422 I3.422 J0.
 X3.422 Y0. IO. J3.422
 G1 X3.347
 Z-1.727 F50.
 G3 X0. Y3.347 I-3.347 J0. F1200.
 X-3.347 Y0. IO. J-3.347
 X0. Y-3.347 I3.347 J0.
 X3.347 Y0. IO. J3.347
 G1 X3.273
 Z-1.793 F50.
 G3 X0. Y3.273 I-3.273 J0. F1200.
 X-3.273 Y0. IO. J-3.273
 X0. Y-3.273 I3.273 J0.
 X3.273 Y0. IO. J3.273
 G1 X3.199
 Z-1.861 F50.
 G3 X0. Y3.199 I-3.199 J0. F1200.
 X-3.199 Y0. IO. J-3.199

X0. Y-3.199 I3.199 J0.
 X3.199 Y0. IO. J3.199
 G1 X3.126
 Z-1.93 F50.
 G3 X0. Y3.126 I-3.126 J0. F1200.
 X-3.126 Y0. IO. J-3.126
 X0. Y-3.126 I3.126 J0.
 X3.126 Y0. IO. J3.126
 G1 X3.054
 Z-1.999 F50.
 G3 X0. Y3.054 I-3.054 J0. F1200.
 X-3.054 Y0. IO. J-3.054
 X0. Y-3.054 I3.054 J0.
 X3.054 Y0. IO. J3.054
 G1 X2.983
 Z-2.069 F50.
 G3 X0. Y2.983 I-2.983 J0. F1200.
 X-2.983 Y0. IO. J-2.983
 X0. Y-2.983 I2.983 J0.
 X2.983 Y0. IO. J2.983
 G1 X2.913
 Z-2.141 F50.
 G3 X0. Y2.913 I-2.913 J0. F1200.
 X-2.913 Y0. IO. J-2.913
 X0. Y-2.913 I2.913 J0.
 X2.913 Y0. IO. J2.913
 G1 X2.843
 Z-2.212 F50.
 G3 X0. Y2.843 I-2.843 J0. F1200.
 X-2.843 Y0. IO. J-2.843
 X0. Y-2.843 I2.843 J0.
 X2.843 Y0. IO. J2.843
 G1 X2.774
 Z-2.285 F50.
 G3 X0. Y2.774 I-2.774 J0. F1200.
 X-2.774 Y0. IO. J-2.774
 X0. Y-2.774 I2.774 J0.
 X2.774 Y0. IO. J2.774
 G1 X2.706
 Z-2.359 F50.
 G3 X0. Y2.706 I-2.706 J0. F1200.
 X-2.706 Y0. IO. J-2.706
 X0. Y-2.706 I2.706 J0.
 X2.706 Y0. IO. J2.706
 G1 X2.639
 Z-2.433 F50.
 G3 X0. Y2.639 I-2.639 J0. F1200.
 X-2.639 Y0. IO. J-2.639
 X0. Y-2.639 I2.639 J0.
 X2.639 Y0. IO. J2.639
 G1 X2.573
 Z-2.508 F50.
 G3 X0. Y2.573 I-2.573 J0. F1200.
 X-2.573 Y0. IO. J-2.573
 X0. Y-2.573 I2.573 J0.
 X2.573 Y0. IO. J2.573
 G1 X2.508
 Z-2.584 F50.
 G3 X0. Y2.508 I-2.508 J0. F1200.
 X-2.508 Y0. IO. J-2.508
 X0. Y-2.508 I2.508 J0.
 X2.508 Y0. IO. J2.508
 G1 X2.443
 Z-2.66 F50.
 G3 X0. Y2.443 I-2.443 J0. F1200.
 X-2.443 Y0. IO. J-2.443
 X0. Y-2.443 I2.443 J0.
 X2.443 Y0. IO. J2.443

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

G1 X2.38
Z-2.738 F50.
G3 X0. Y2.38 I-2.38 J0. F1200.
X-2.38 Y0. I0. J-2.38
X0. Y-2.38 I2.38 J0.
X2.38 Y0. I0. J2.38
G1 X2.317
Z-2.816 F50.
G3 X0. Y2.317 I-2.317 J0. F1200.
X-2.317 Y0. I0. J-2.317
X0. Y-2.317 I2.317 J0.
X2.317 Y0. I0. J2.317
G1 X2.256
Z-2.895 F50.
G3 X0. Y2.256 I-2.256 J0. F1200.
X-2.256 Y0. I0. J-2.256
X0. Y-2.256 I2.256 J0.
X2.256 Y0. I0. J2.256
G1 X2.195
Z-2.974 F50.
G3 X0. Y2.195 I-2.195 J0. F1200.
X-2.195 Y0. I0. J-2.195
X0. Y-2.195 I2.195 J0.
X2.195 Y0. I0. J2.195
G1 X2.135
Z-3.054 F50.
G3 X0. Y2.135 I-2.135 J0. F1200.
X-2.135 Y0. I0. J-2.135
X0. Y-2.135 I2.135 J0.
X2.135 Y0. I0. J2.135
G1 X2.076
Z-3.135 F50.
G3 X0. Y2.076 I-2.076 J0. F1200.
X-2.076 Y0. I0. J-2.076
X0. Y-2.076 I2.076 J0.
X2.076 Y0. I0. J2.076
G1 X2.018
Z-3.217 F50.
G3 X0. Y2.018 I-2.018 J0. F1200.
X-2.018 Y0. I0. J-2.018
X0. Y-2.018 I2.018 J0.
X2.018 Y0. I0. J2.018
G1 X1.961
Z-3.299 F50.
G3 X0. Y1.961 I-1.961 J0. F1200.
X-1.961 Y0. I0. J-1.961
X0. Y-1.961 I1.961 J0.
X1.961 Y0. I0. J1.961
G1 X1.905
Z-3.382 F50.
G3 X0. Y1.905 I-1.905 J0. F1200.
X-1.905 Y0. I0. J-1.905
X0. Y-1.905 I1.905 J0.
X1.905 Y0. I0. J1.905
G1 X1.85
Z-3.465 F50.
G3 X0. Y1.85 I-1.85 J0. F1200.
X-1.85 Y0. I0. J-1.85
X0. Y-1.85 I1.85 J0.
X1.85 Y0. I0. J1.85
G1 X1.796
Z-3.55 F50.
G3 X0. Y1.796 I-1.796 J0. F1200.
X-1.796 Y0. I0. J-1.796
X0. Y-1.796 I1.796 J0.
X1.796 Y0. I0. J1.796
G1 X1.743
Z-3.634 F50.

G3 X0. Y1.743 I-1.743 J0. F1200.
X-1.743 Y0. I0. J-1.743
X0. Y-1.743 I1.743 J0.
X1.743 Y0. I0. J1.743
G1 X1.691
Z-3.72 F50.
G3 X0. Y1.691 I-1.691 J0. F1200.
X-1.691 Y0. I0. J-1.691
X0. Y-1.691 I1.691 J0.
X1.691 Y0. I0. J1.691
G1 X1.64
Z-3.806 F50.
G3 X0. Y1.64 I-1.64 J0. F1200.
X-1.64 Y0. I0. J-1.64
X0. Y-1.64 I1.64 J0.
X1.64 Y0. I0. J1.64
G1 X1.589
Z-3.893 F50.
G3 X0. Y1.589 I-1.589 J0. F1200.
X-1.589 Y0. I0. J-1.589
X0. Y-1.589 I1.589 J0.
X1.589 Y0. I0. J1.589
G1 X1.54
Z-3.98 F50.
G3 X0. Y1.54 I-1.54 J0. F1200.
X-1.54 Y0. I0. J-1.54
X0. Y-1.54 I1.54 J0.
X1.54 Y0. I0. J1.54
G1 X1.492
Z-4.067 F50.
G3 X0. Y1.492 I-1.492 J0. F1200.
X-1.492 Y0. I0. J-1.492
X0. Y-1.492 I1.492 J0.
X1.492 Y0. I0. J1.492
G1 X1.445
Z-4.156 F50.
G3 X0. Y1.445 I-1.445 J0. F1200.
X-1.445 Y0. I0. J-1.445
X0. Y-1.445 I1.445 J0.
X1.445 Y0. I0. J1.445
G1 X1.399
Z-4.245 F50.
G3 X0. Y1.399 I-1.399 J0. F1200.
X-1.399 Y0. I0. J-1.399
X0. Y-1.399 I1.399 J0.
X1.399 Y0. I0. J1.399
G1 X1.354
Z-4.334 F50.
G3 X0. Y1.354 I-1.354 J0. F1200.
X-1.354 Y0. I0. J-1.354
X0. Y-1.354 I1.354 J0.
X1.354 Y0. I0. J1.354
G1 X1.31
Z-4.424 F50.
G3 X0. Y1.31 I-1.31 J0. F1200.
X-1.31 Y0. I0. J-1.31
X0. Y-1.31 I1.31 J0.
X1.31 Y0. I0. J1.31
G1 X1.267
Z-4.514 F50.
G3 X0. Y1.267 I-1.267 J0. F1200.
X-1.267 Y0. I0. J-1.267
X0. Y-1.267 I1.267 J0.
X1.267 Y0. I0. J1.267
G1 X1.225
Z-4.605 F50.
G3 X0. Y1.225 I-1.225 J0. F1200.
X-1.225 Y0. I0. J-1.225

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

X0. Y-1.225 I1.225 J0.
 X1.225 Y0. I0. J1.225
 G1 X1.185
 Z-4.697 F50.
 G3 X0. Y1.185 I-1.185 J0. F1200.
 X-1.185 Y0. I0. J-1.185
 X0. Y-1.185 I1.185 J0.
 X1.185 Y0. I0. J1.185
 G1 X1.145
 Z-4.788 F50.
 G3 X0. Y1.145 I-1.145 J0. F1200.
 X-1.145 Y0. I0. J-1.145
 X0. Y-1.145 I1.145 J0.
 X1.145 Y0. I0. J1.145
 G1 X1.106
 Z-4.881 F50.
 G3 X0. Y1.106 I-1.106 J0. F1200.
 X-1.106 Y0. I0. J-1.106
 X0. Y-1.106 I1.106 J0.
 X1.106 Y0. I0. J1.106
 G1 X1.069
 Z-4.973 F50.
 G3 X0. Y1.069 I-1.069 J0. F1200.
 X-1.069 Y0. I0. J-1.069
 X0. Y-1.069 I1.069 J0.
 X1.069 Y0. I0. J1.069
 G1 X1.032
 Z-5.067 F50.
 G3 X0. Y1.032 I-1.032 J0. F1200.
 X-1.032 Y0. I0. J-1.032
 X0. Y-1.032 I1.032 J0.
 X1.032 Y0. I0. J1.032
 G1 X.997
 Z-5.16 F50.
 G3 X0. Y.997 I-.997 J0. F1200.
 X-.997 Y0. I0. J-.997
 X0. Y-.997 I.997 J0.
 X.997 Y0. I0. J.997
 G1 X.962
 Z-5.254 F50.
 G3 X0. Y.962 I-.962 J0. F1200.
 X-.962 Y0. I0. J-.962
 X0. Y-.962 I.962 J0.
 X.962 Y0. I0. J.962
 G1 X.929
 Z-5.349 F50.
 G3 X0. Y.929 I-.929 J0. F1200.
 X-.929 Y0. I0. J-.929
 X0. Y-.929 I.929 J0.
 X.929 Y0. I0. J.929
 G1 X.897
 Z-5.443 F50.
 G3 X0. Y.897 I-.897 J0. F1200.
 X-.897 Y0. I0. J-.897
 X0. Y-.897 I.897 J0.
 X.897 Y0. I0. J.897
 G1 X.866
 Z-5.538 F50.
 G3 X0. Y.866 I-.866 J0. F1200.
 X-.866 Y0. I0. J-.866
 X0. Y-.866 I.866 J0.
 X.866 Y0. I0. J.866
 G1 X.836
 Z-5.634 F50.
 G3 X0. Y.836 I-.836 J0. F1200.
 X-.836 Y0. I0. J-.836
 X0. Y-.836 I.836 J0.
 X.836 Y0. I0. J.836

G1 X.807
 Z-5.73 F50.
 G3 X0. Y.807 I-.807 J0. F1200.
 X-.807 Y0. I0. J-.807
 X0. Y-.807 I.807 J0.
 X.807 Y0. I0. J.807
 G1 X.78
 Z-5.826 F50.
 G3 X0. Y.78 I-.78 J0. F1200.
 X-.78 Y0. I0. J-.78
 X0. Y-.78 I.78 J0.
 X.78 Y0. I0. J.78
 G1 X.753
 Z-5.922 F50.
 G3 X0. Y.753 I-.753 J0. F1200.
 X-.753 Y0. I0. J-.753
 X0. Y-.753 I.753 J0.
 X.753 Y0. I0. J.753
 G1 X.728
 Z-6.019 F50.
 G3 X0. Y.728 I-.728 J0. F1200.
 X-.728 Y0. I0. J-.728
 X0. Y-.728 I.728 J0.
 X.728 Y0. I0. J.728
 G1 X.703
 Z-6.116 F50.
 G3 X0. Y.703 I-.703 J0. F1200.
 X-.703 Y0. I0. J-.703
 X0. Y-.703 I.703 J0.
 X.703 Y0. I0. J.703
 G1 X.68
 Z-6.214 F50.
 G3 X0. Y.68 I-.68 J0. F1200.
 X-.68 Y0. I0. J-.68
 X0. Y-.68 I.68 J0.
 X.68 Y0. I0. J.68
 G1 X.658
 Z-6.311 F50.
 G3 X0. Y.658 I-.658 J0. F1200.
 X-.658 Y0. I0. J-.658
 X0. Y-.658 I.658 J0.
 X.658 Y0. I0. J.658
 G1 X.637
 Z-6.409 F50.
 G3 X0. Y.637 I-.637 J0. F1200.
 X-.637 Y0. I0. J-.637
 X0. Y-.637 I.637 J0.
 X.637 Y0. I0. J.637
 G1 X.617
 Z-6.507 F50.
 G3 X0. Y.617 I-.617 J0. F1200.
 X-.617 Y0. I0. J-.617
 X0. Y-.617 I.617 J0.
 X.617 Y0. I0. J.617
 G1 X.599
 Z-6.605 F50.
 G3 X0. Y.599 I-.599 J0. F1200.
 X-.599 Y0. I0. J-.599
 X0. Y-.599 I.599 J0.
 X.599 Y0. I0. J.599
 G1 X.581
 Z-6.704 F50.
 G3 X0. Y.581 I-.581 J0. F1200.
 X-.581 Y0. I0. J-.581
 X0. Y-.581 I.581 J0.
 X.581 Y0. I0. J.581
 G1 X.565
 Z-6.803 F50.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

G3 X0. Y.565 I-.565 J0. F1200.
X-.565 Y0. I0. J-.565
X0. Y-.565 I.565 J0.
X.565 Y0. I0. J.565
G1 X.55
Z-6.902 F50.
G3 X0. Y.55 I-.55 J0. F1200.
X-.55 Y0. I0. J-.55
X0. Y-.55 I.55 J0.
X.55 Y0. I0. J.55
G1 X.536
Z-7.001 F50.
G3 X0. Y.536 I-.536 J0. F1200.
X-.536 Y0. I0. J-.536
X0. Y-.536 I.536 J0.
X.536 Y0. I0. J.536
G1 X.523
Z-7.1 F50.
G3 X0. Y.523 I-.523 J0. F1200.
X-.523 Y0. I0. J-.523
X0. Y-.523 I.523 J0.
X.523 Y0. I0. J.523
G0 Z2.
M5
G91 G28 Z0.
G28 Y0. A0.
M30
%

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

FIRMA ESTUDIANTES	<u>Jennifer Perez Gutierrez</u> <u>Emerzon P</u> <u>Nelson Bran</u>
FIRMA ASESOR	<u>Jorge Siller</u>
FECHA ENTREGA: _____	

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____		
RECHAZADO ___	ACEPTADO ___	ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___
		ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<p>FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____</p> <p style="text-align: right;">ACTA NO. _____</p> <p style="text-align: right;">FECHA ENTREGA: _____</p>
--