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

VALIDACION EXPERIMENTAL DE DIFERENTES TEORIAS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AIREACION.

Edwin Herrera Agudelo

Sebastian Pérez Pérez

Mateo Del Gallego Rico

Ingeniería en Electromecánica y Mecatrónica.

Jorge Andrés Sierra Del Rio

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Octubre de 2018

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

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

RESUMEN

En Colombia, le generación de energía hidráulica representa un 69.9 % del consumo total, sumado a los grandes proyectos de centrales hidráulicas con represamiento de agua, representan un pilar para el desarrollo de la economía colombiana. Estas centrales controlan el nivel del embalse mediante compuertas de regulación ubicadas en los canales de descarga. Para el correcto funcionamiento de estos, se deben emplear sistemas de aireación, los cuales permiten oxigenar el agua, evitar problemas de cavitación, vibración en la estructura y garantizar la operación de la presa.

Para investigar los efectos que se producen en los canales hidráulicos de las presas, se han realizado gran variedad de experimentos con modelos a pequeña escala durante un largos período de tiempo, lo que generalmente representa problemas como costos elevados de diseño e investigación, dificultades de medición y registro de datos, problemas de escalado, disponibilidad de equipos entre otros. Las formulaciones empíricas planteadas a lo largo del tiempo por diversos investigadores y catedráticos son fundamentales para el diseño y construcción de sistemas de aireación en túneles de descarga cerrados con compuertas sometidas a altas presiones, sin embargo, a raíz de la diversidad de las variables de funcionamiento y operación a escala real de los canales, se requiere precisar los valores tanto en modelos analíticos como en modelos experimentales y con ello confrontar los resultados que permitan realizar diseños acordes a las necesidades. El objetivo de esta propuesta consiste en fabricar un prototipo reducido de un canal hidráulico que permita generar un banco de resultados experimentales con el fin de validar modelos computacionales a futuro. Para el desarrollo del proyecto se plantea inicialmente realizar un estado del arte concerniente a los modelos de cálculo para el sistema de aireación, cargas hidrodinámicas sobre las compuertas, luego se realizar el escalado de la descarga partiendo de modelos empíricos y finalmente se realiza la construcción y pruebas del canal, contrastando resultados teóricos y experimentales.

Palabras clave: Aireación-experimental-canal hidráulico-cavitación-compuerta radial.

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

RECONOCIMIENTOS

En esta sección se expresan los agradecimientos a las personas que colaboraron con la formación del estudiante y con el desarrollo del trabajo de grado, grupos de investigación que apoyaron con equipos, componentes, software, etc., colegas, familiares y amigos que realizaron un aporte importante en el desarrollo del trabajo o en la elaboración del informe final del mismo.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

β	<i>Relación de demanda de aire</i>
Q_{aire}	<i>Caudal de aire</i>
Q_{agua}	<i>Caudal de agua</i>
Fr	<i>Número de Froude en la vena contracta.</i>
V	<i>Velocidad media del agua, fps (mps)</i>
G	<i>Aceleración debida a la gravedad, ft / s² (m / s²)</i>
Y	<i>Profundidad del agua, pies (m)</i>
CAD	<i>Diseño asistido por computador</i>
CFD	<i>Dinámica de fluidos computacional</i>
MATyER	<i>Grupo de Investigación en Materiales Avanzados y Energía</i>

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	11
3. METODOLOGÍA.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	33
REFERENCIAS	35
APÉNDICE.....	37


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

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace referencia a la validación experimental de diferentes teorías para el diseño de sistemas de aireación especialmente en túneles cerrados de descarga hidráulica en presas, sistemas que permite ingresar desde la atmosfera y combinar con el agua que fluye por el canal, cantidades de aire requeridas de acuerdo a las condiciones operacionales, contribuyendo a la generación de escenarios seguros, restringiendo el desarrollo y propagación de variables peligrosas que puedan afectar la estructura, brindando mayor control de la operación y el estado estructural de los componentes de la descarga como compuertas y túneles, evitando con ello incidentes que puedan afectar el medio ambiente, la operación y estabilidad del sistema de descarga.

Los túneles de descarga o vertederos son un conjunto de estructuras diseñadas e instaladas en embalses con el fin de evacuar el agua de manera controlada conservando los niveles de operación adecuados, regulando el caudal ecológico, facilitando la ejecución de limpiezas del fondo manteniendo la operación controlada y segura del embalse durante su vida útil. La operación, funcionamiento y estabilidad estructural de los túneles de descarga o vertederos son indispensables para la estabilidad global y funcionamiento óptimo de cualquier tipo de presa indiferente de su fin funcional.

Las características principales que llevan a desarrollar análisis y estudios detallados de estos tipos de sistemas se debe a que se presentan un caso crítico en el comportamiento del sistema cuando se debe controlar un caudal de descarga mediante la operación y posicionamiento intermedio o total de las compuertas, esta actividad ocasiona el aumento de niveles de vibración en la estructura, produce mayores esfuerzos mecánicos en todos los componentes, se presenta cavitación y todo esto a raíz del aumento en la demanda de aire, factor que influyen y pueden comprometer la firmeza general de la presa.

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

Para fines de diseño, es de suma importancia tener conocimiento de las variables y factores que intervienen en el comportamiento, la construcción y operación del canal hidráulico, para ello una de los métodos empleadas es el planteamiento de modelos que permitan predecir entre muchos más factores, la cantidad de aire a suministrar por el sistema de aireación, con el fin de garantizar la relación aire-agua requerida para garantizar la operación segura de la compuerta mediante variaciones de caudal o posición de las compuertas al momento de cierre o apertura de la misma. A causa de las complicaciones que implica tomar registro de datos o desarrollar estudios en sitio y a escala real, tradicionalmente muchos de los sistemas de aireación se han realizado a partir de modelos físicos y ensayos de laboratorio pero con problemas de escalado, sensibilidad a vibraciones, cavitaciones, presiones, características geométricas entre otras. En la literatura se encuentran diferentes modelos de cálculo para el diseño del sistema de aireación, los cuales difieren considerablemente para un diseño específico, lo cual puede incurrir en sobrecostos del sistema o defecto de aire en la descarga, ocasionando problemas de cavitación y operatividad de la compuerta. Los modelos físicos y matemáticos se desarrollan con el fin de determinar la demanda de aire en el sistema de descarga, las variaciones de condiciones en el sistema como son la forma, las transición y abocinamiento estructural de la zona, la geometría, el diseño de las compuertas, el posicionamiento de esta (Abierta/cerrada), la velocidad del agua, el diseño y estructura de los sistemas de aireación.

Se pretende fabricar a escala un canal hidráulico que permita validar experimentalmente los fenómenos ocurridos en estos sistemas mediante dispositivos de control y medición instalados en puntos críticos que admitan obtener valores reales del comportamiento y operación del sistema logrando con ello tener una visión amplia y unos datos reales que admitan tener una perspectiva de los fenómenos a los que está expuesto los componentes de un canal hidráulico a escala real, con esto más resultados de estudios computacionales poder definir un correcto diseño en especial de las compuertas instaladas en estos canales

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

disminuyendo posibles riesgos hidráulicos e hidrodinámicos que afecten la estabilidad de la presa, inicialmente se realizara la búsqueda de información relacionada con teorías, diseños, simulaciones y experimentación de sistema de aireación en canales hidráulicos de descarga, se identificarán los componentes del sistema a diseñar y las variables a tener en cuenta para el desarrollo eficiente y sostenible de los canales de descarga hidráulica con sistemas de aireación obteniendo bases fundamentales para realizar el diseño y modelación geométrica del canal de descarga mediante un software CAD, basado en la información teórica disponible, inicialmente se definirán las necesidades funcionales del canal y se procederá a modelar el sistema en un software CAD (Solidworks, NX) para posteriormente simularlo y contrastar el diseño del sistema de aireación mediante un software CFD (Ansys- Fluent) que permitirá someter los perfiles a condiciones fluido-dinámicas de operación real. Una vez obtenida una geometría previa del sistema de aireación, se procede a realizar el diseño y simulación de canal hidráulicos de descarga buscando incrementos de caudal con el fin de estimar la incidencia en las condiciones de aireación. Esto lograra predecir un comportamiento aproximado del sistema a condiciones reales de operación. Como es conocido, la dinámica de cualquier fluido, provoca esfuerzos, torsiones, deflexiones, momentos y fuerzas en general, sobre los materiales y estructuras de los que se compone el problema a resolver, podemos conocer a partir de los resultados del análisis en CFD el campo de presiones sobre los componentes del sistema de aireación y del túnel de descarga, con este análisis se realizará la evaluación objetiva del comportamiento resistente de cada componente y su posible optimización geométrica o redimensionamiento desde el punto de vista estructural para efectuar inicialmente el despiece necesario del sistema de aireación y del canal hidráulico que permita continuar con la fabricación del prototipo a escala reducida y con ello realizar una validación experimental en un banco hidráulico del grupo MATyER-CADD en relación a resultados numéricos y teorías diferentes concernientes a la relación aire-agua. Con esto se puede estimar el comportamiento del ducto de aireación y del canal de descarga hidráulica a escala real por teorías de similitud, y a su vez se podrá identificar futuros problemas en el

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

funcionamiento antes de proceder con la manufactura del sistema a escala real, se finalizara con la elaborara del informe el cual contiene la descripción detallada de las teorías, procedimientos y resultados obtenidos al ejecutar esta propuesta.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

En Colombia proyectos hidroeléctrico como el de San Carlos, Porce III, Espíritu Santo, Piedra Del Sol, Cañafisto, entre otros, tienen proyectado u operar con compuertas radiales ubicadas en los canales de descarga o vertedero, estos son un conjunto de estructuras previstas para mantener los niveles de operación de los embalse, regular el caudal ecológico, efectuar limpieza del fondo de la presa eliminando sólidos y sedimentos , evacuar crecientes y mantener una operación controlada del embalse durante su vida útil, (Calderón Villegas, D. (2016)), todas estas centrales están conformadas por un trayecto a presión en donde el fluido circula por un túnel , seguido de una zona donde está instalada la compuerta o estructura designada para controlar el caudal de descarga, luego se pasa a un túnel donde el agua fluye con una superficie libre finalizando en un pozo de pacificación, todas estas estructuras y elementos que conforman el sistema tienen variedad de comportamientos y están sometidas a esfuerzos variables a raíz de la operación y funcionamiento de toda la central, conformando así el grupo de estructuras indispensables para la estabilidad global y ejercicio óptimo de la presa, en estos casos las compuertas son los elementos estructurales que más están sujetos a condiciones de alta presión y velocidad de flujo aumentando la probabilidad de daño por erosión, cavitación, vibración y ataque de choque, una vez que comienza un desgaste o afectación en la superficie de las compuertas o del canal, el daño se acelera, lo que implica severas condiciones de seguridad para la central como para su entorno.

Existen diferentes diseños y estructuras de canales hidráulicos o vertederos entre ellos con o sin compuertas, lisos, escalonados, libres (sin canal), entre otros, instalados en centrales hidroeléctricas o presas construidas para el abastecimiento de agua a poblaciones con fines de consumo, agricultura o recreación. En los primeros diseños y construcción de canales hidráulicos con compuertas, no se tomaron las precauciones frente a la cavitación y la

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

vibración, poco después de la construcción de la presa de Roosevelt en el Río Salado, ubicado al noreste de Phoenix, Arizona EEUU en el año de 1908, se evidenciaron una serie de problemas a causa de la erosión en las estructuras de hormigón, se observaron fallas mecánicas en los remaches y avería del metal, se hicieron las reparaciones e intervenciones pertinentes pero poco tiempo después los inconvenientes volvieron a surgir, otro caso relevante se presentó en la presa de Presa Pathfinder sobre el río North Platte en Wyoming EEUU, durante el funcionamiento del canal de descarga se comenzaron a escuchar fuertes golpes y ruidos que aumentaban con el caudal de agua, tras cerrar el ducto y realizar las inspecciones internas se encontraron grandes pérdidas de masa, metal y trozos de hormigón a lo largo de la estructura del canal, en algunos sitios el recubrimiento metálico se había doblado como si fuera un papel, luego de este suceso se realizó la instalación de un ducto de aireación aguas abajo de las compuertas, se reparó y se puso en funcionamiento nuevamente el túnel obteniendo con este sistema la solución efectiva a los problemas anteriormente encontrados (Pozo, (2011).), desde entonces a los túneles de descarga en el área de ubicación y operación de las compuertas se han instalado ductos que permitan ingresar aire en gran volumen, el agua arrastra el aire a lo largo del túnel y el sistema de aireación entra en operación permitiendo mantener la presión interna cercana a la atmosférica y evitar fallas en la estructura durante la operación parcial de las compuertas

Uno de los problemas más relevantes en los canales hidráulicos es la reducción de la presión cuando el fluido fluye por debajo de las compuertas, este fenómeno se ha denominado Downpull, la distribución no uniforme de la carga hidráulica provoca una reducción de la presión, debido a esto, se han llevado a cabo estudios para minimizar la vibración, la cavitación, el daño estructural, maximizar el coeficiente de descarga y minimizar la caída o el levantamiento de las compuertas. Entre los elementos mencionados, el downpull y la aireación se considera de gran importancia, los estudios ejecutados se han centrado en gran medida en la definición de las características geométricas de las compuertas, su punto de

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

operación, niveles de apertura, sistemas y flujos de aireación, todos factores que tiene gran influencia en la caída de presión neta en la red.

La caída hidrodinámica en los canales o túneles hidráulicos especialmente en el área de las compuertas, se debe principalmente a la diferencia entre las fuerzas de presión que actúan sobre la parte superior y las superficies de los labios de estas. La presión en la superficie superior depende de la posición de apertura de la compuerta y del nivel de agua en la cámara, por lo que la caída hidrodinámica puede definirse como la fuerza total inducida por el agua que fluye sobre las superficies de la compuerta que actúa en la dirección de cierre, por lo tanto, para abrir una compuerta en un canal de alta presión en la descarga de fondo de una presa de gran altura, el mecanismo de elevación debe resistir el peso de la compuerta, la caída hacia abajo y la resistencia a la fricción, esto determina la capacidad requerida del polipasto a instalarse en el sistema de apertura o cierre. En algunos casos, la caída negativa que resulta en una fuerza de elevación puede evitar el cierre seguro de la compuerta, cuando esta se mueve rápidamente como en el caso de un cierre de emergencia o en circunstancias adversas, se pueden producir daños irreversibles en la estructura, lo que dejaría el sistema deshabilitado.

A través de los estudios realizados por diferentes autores, se afirma que no es práctico definir una fórmula de predicción para el downpull que cubra todo el rango de variables involucradas, debido a la gran cantidad de parámetros y condiciones encontradas. Por esta razón, los estudios se llevan a cabo a través del análisis numérico aprovechando la potencia computacional, en estos temas las simulaciones numéricas se convirtieron en un enfoque importante, especialmente desde el desarrollo de softwares capaces de predecir el comportamiento del sistema y la magnitud de las variables, obteniendo datos óptimos para ampliar análisis experimentales en estructuras a escala, diseño y desarrollo de canales hidráulicos confiables, seguros, fáciles de operar y mantener, aportando datos y documentación soportada real para investigadores, personal expertos en el área de equipos

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

y sistemas hidromecánicos y para todos aquellos que trabajen con descargas de fondo en presas de gran altura, cuyo interés principal sea la determinación los factores que afecten la estructura y la demanda de aire en la zona de las compuertas y el diseño del sistema de aireación.

Naudascher et al. (1964, 1986) presentaron un análisis unidimensional de la descarga que pasa por debajo de una compuerta situada en el túnel de alta presión y la caída hidráulica que actúa sobre ella. Los estudios de Naudascher mostraron que el downpull se ve significativamente afectado no solo por la geometría del fondo de la compuerta, sino también por la velocidad de flujo que pasa por la parte superior de esta a través de la cámara, (Sagar y Tulus (1979)) indicaron que factores importantes como la geometría, las capas límite y la turbulencia influyen en la caída de presión sobre la compuerta y explican varias fuerzas que desempeñan papeles importantes durante la apertura y el cierre.

También existen trabajos como el de (Ozkan, Tuna, Baylar, & Ozturk, 2014) que se centró en estimar la tasa óptima para la demanda de aire a la máxima eficiencia en compuertas de alta presión en ductos circulares, los resultados mostraron que la eficiencia de la aireación aumentó con la relación de demanda de aire a un cierto punto y luego la eficiencia de la aireación no cambió con un aumento adicional de la relación de demanda de aire. Por lo tanto, hubo un valor óptimo para la relación que depende del número de Froude, que proporciona la máxima eficiencia de aireación.

Cuando en un canal de alta presión es instalada una compuerta y esta opera bajo aperturas parciales, un flujo de alta velocidad se presenta aguas abajo de la estructura transfiriendo como consecuencia la generación de sub-presiones, por lo tanto se puede generar un daño estructural en la compuerta y puede presentarse el fenómeno de cavitación, para ello en el canal donde está situada la compuerta se instala un ducto de aireación con la atmósfera

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

que permita fluir aire hacia la estructura y se puedan mantener presiones seguras y estables que no influyan en el deterioro y colapso de la estructura (Ver figura 1)

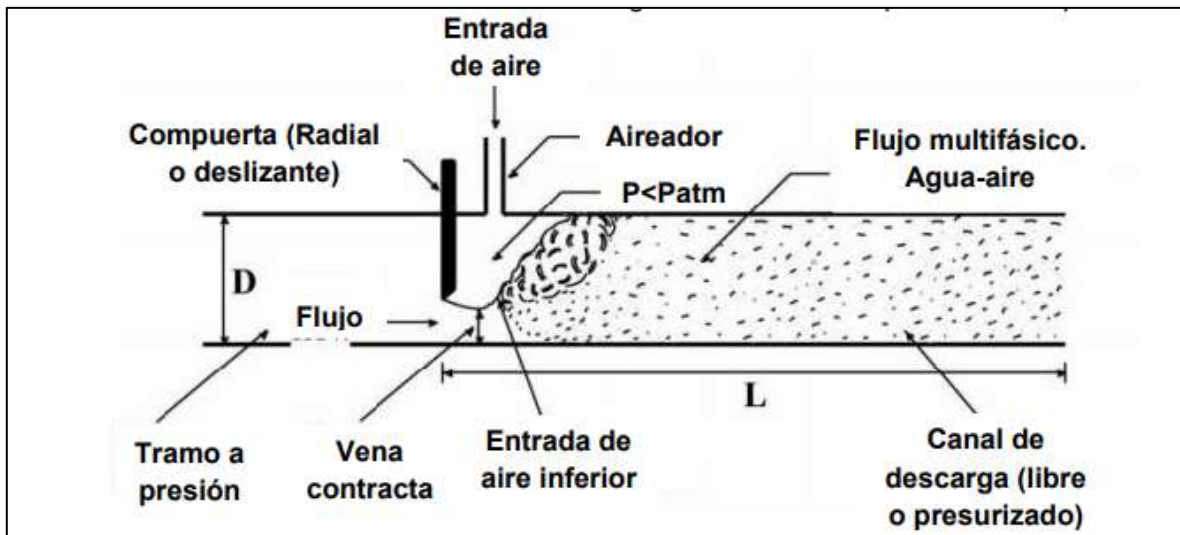


Figura 1: Esquema básico flujo agua-aire tras una compuerta de alta presión.

Tomado de (Cihat Tuna, Ozkan, & Baylar, 2014)

Para determinar la demanda de aire en las descargas de fondo con compuertas de alta presión, la mayoría de las formulaciones encontradas han sido expresadas en términos de la tasa de demanda de aire, la cual representa la relación entre el caudal de aire y el caudal de agua. Esta relación depende de varios parámetros tales como: 1) la forma de la transición y abocinamiento en la zona de la estructura de control, 2) la geometría de la compuerta (deslizante o radial), 3) la posición de la compuerta (apertura parcial 4) y la velocidad del agua en el conducto (Salazar, Morán, Oñate, Toledo, & Riquelme, 2012)

En el Laboratorio Hidráulico de la Universidad de Firat, (ver Figura 2) se realizaron análisis experimentales con una configuración física a escala, utilizando un tanque de agua, un medidor de oxígeno disuelto, un mezclador, una bomba de agua, una válvula de control de flujo, un medidor de agua de flujo electromagnético, una compuerta de esclusa, un

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

Uno de los inconvenientes presentados al realizar modelaciones a escala y análisis experimentales es el escalamiento de los resultados obtenidos mediante los modelos de flujos ya que pueden existir efectos de tamaño/escala lo que implica una desviación considerable y trágica a la hora de diseñar. (Ozkan, Tuna, Baylar, & Ozturk, 2014)

Poder evaluar y estudiar las condiciones hidrodinámicas que se producen en un canal de descarga mediante compuertas radiales sometidas a altas presiones a causa de la cabeza hidráulica aportada por la capacidad del embalse y conocer los valores producidos de subpresiones en el área de operación de las compuertas, lograr comprender y comprobar los efectos de los sistemas de aireación, es una tarea que varios investigadores han optado desarrollar a través de los tiempos, actualmente se cuentan con herramientas de simulación computacional que ayudan a identificar, comprender y plasmar en funciones matemáticas las variables que intervienen en los canales de descarga hidráulica pero debido a la complejidad de los sistemas, a la criticidad existente entre la relación de caudales de agua y caudales de aire en función del grado de apertura de las compuertas, es crucial estudiar y comprender el comportamiento, diseño, operación e interacción de cada uno de los elementos del conjunto de sistemas que comprenden el canal de descarga.

La aireación o demanda de aire en los canales de descarga o vertederos hidráulicos, de acuerdo a las condiciones de diseño y capacidades del embalse se puede dar de forma natural, a partir del aire existente en las zonas no ocupadas por el agua al interior de la estructura el cual penetra el sistema por la final del ducto, sin embargo en sistemas de grandes magnitudes los requerimientos de aireación son muy superiores y en la mayoría de los casos se requiere la instalación de ductos o dispositivos de aireación artificial, más aun cuando se busca conservar la confiabilidad y seguridad del sistema. Los sistemas de aireación son un fenómeno complejo, su comprensión requiere conocimiento matemático extensivo, frecuentemente las formulaciones propuestas por lo diferentes autores

desarrolladas a partir de estudios, ensayos y modelaciones a escala de este fenómeno no son concernientes pero si se llega a determinar parámetros comunes en el estudio de la aireación para cuantificar la demanda o arrastre de aire requerido por el sistema en función de la concentración de aire, concentración de agua y coeficiente de aireación.

Una de las condiciones claras en el estudio y comportamiento de la aireación es la concentración de aire en el agua que evita la producción de cavitación, esta se ha establecido en el 8% (Yazdi, (2011).) , en la actualidad existen gran variedad de diseños básicos que buscan aportar la cantidad de aire al canal para alcanzar esta proporción, lo fundamental es determinar las condiciones a las que estará expuesto la operación del canal para determinar la más viable, segura y económica estructural y operacionalmente.

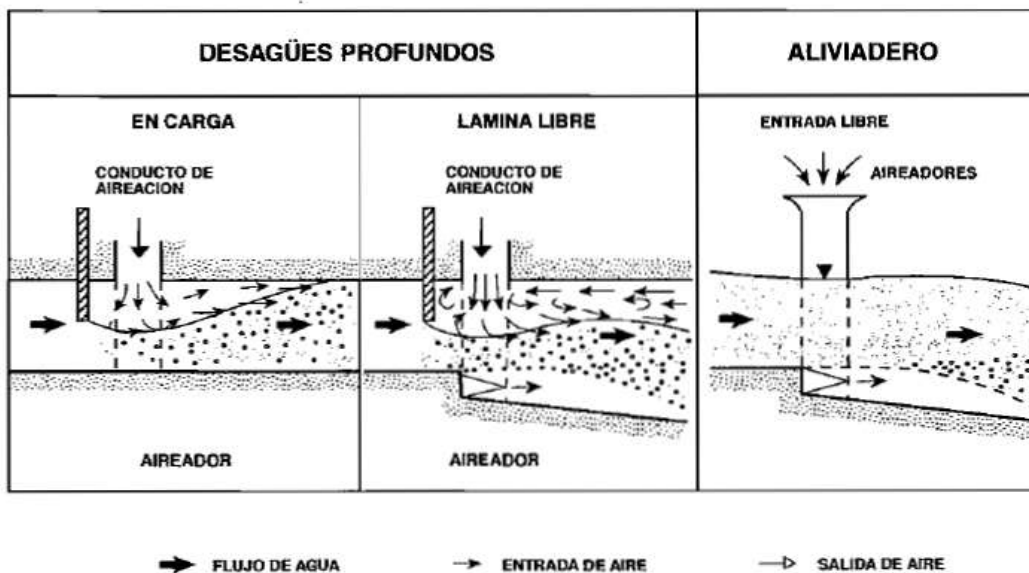


Figura 4: Formas de Aireación.

(Falvey., 1980)

El factor más desfavorable para todo sistema hidráulico es la cavitación, esta se produce en el sistema cuando a una temperatura constante la presión en el sistema disminuye hasta alcanzar el estado de vapor, perdiendo la homogeneidad del fluido y creando áreas con flujo

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

bifásico, si la presión aumenta de nuevo las cavidades desarrolladas se vuelven inestables y colapsan recuperando rápidamente el estado líquido, liberando localmente cantidades de energía importantes que afectan los materiales, dañan y erosionando las estructuras.

Uno de los sucesos más relevantes producto de la cavitación a raíz de flujos altamente turbulentos fue el colapso en 1974 de uno de los canales de descarga de la presa Tarbela en Pakistan (Kenn y Garrod, 1981). La dimensión de los daños producto de la cavitación está relacionado con la resistencia de los materiales, el tiempo de exposición, la velocidad y el contenido de aire en el fluido.

Gracias al avance en el desarrollo de métodos numéricos y el progreso de los ordenadores, en los últimos años está creciendo la frecuencia con la que se utilizan softwares y herramientas de cálculo numérico para el diseño de estructuras hidráulicas, sin embargo a partir de los modelos ya planteados para el diseño del sistema de aireación se tienen una serie de teorías y funciones matemáticas que han dado vía libre al estudio y desarrollo de esta clase de sistemas. Entre las investigaciones experimentales y estudios teóricos más relevantes desarrollados a través de tiempo referente a la demanda de aire en los canales de descarga cerrados se tienen los trabajos de Kalinske & Robertson (1943), Campbell & Guyton (1953), Haindl & Sotornik (1957), Rajaratnam (1962), USACE (1964), Wisner (1965), Sharma (1976), Stahl & Hager (1999), Speerli (1999), Speerli & Hager (2000), Escarameia (2007), Oveson (2008) and Mortensen (2009)) donde se pueden extraer una serie de ecuaciones para determinar la proporción de la demanda de aire bajo las variables de flujo (Ozkan, Tuna, Baylar, & Ozturk, 2014), donde β es la relación de demanda de aire

$$\beta = Q_{aire} / Q_{agua}$$

Fr es el número de Froude en la vena contracta.

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

$$Fr = \frac{V}{g * Y}$$

Donde V es la Velocidad media del agua, fps (mps), G equivale a Aceleración debida a la gravedad, ft / s² (m / s²), y Y es Profundidad del agua, pies (m) (Oveson, (2008).)

AUTOR DE LA ECUACION	RELACION PREDICTIVA	COMENTARIOS
Kalinske & Robertson(1943)	$\beta = 0.0066 (Fr - 1)^{1.4}$	Salto hidráulico dentro de un solo canal circular.
Campbell & Guyton (1953)	$\beta = 0.04 (Fr - 1)^{0.85}$	Ecuación similar a Kalinske & Robertson(1943)
Haindl & Sotornik (1957)	$\beta = 0.012 (Fr - 1)^{1.4}$	Canal rectangular cerrado.
Rajaratnam (1962)	$\beta = 0.018 (Fr - 1)^{1.245}$	Mediciones de flujos bifásicos en saltos hidráulicos.
USACE (1964)	$\beta = 0.03 (Fr - 1)^{1.06}$	Flujo en superficie libre.
Wisner (1965)	$\beta = 0.024 (Fr - 1)^{1.4}$	Flujo de superficie libre.
	$\beta = 0.033 (Fr - 1)^{1.4}$	Flujo espumoso.
Sharma (1976)	$\beta = 0.09 Fr$	Flujo en superficie libre.
	$\beta = 0.2 Fr$	Flujo espumoso.

Tabla #1 Ecuaciones predictivas para la relación demanda de aire en canales.
(Ozkan, Tuna, Baylar, & Ozturk, 2014)

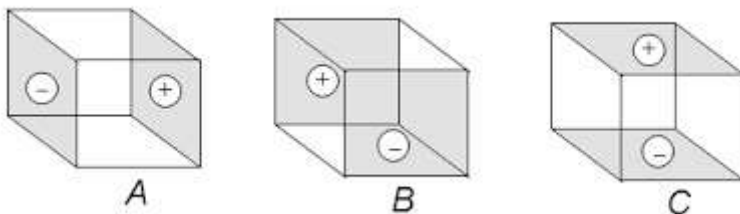
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Inicialmente es simplificada y escalada la geometría de un canal de descarga real del cual se obtiene el modelo CAD de la misma, mediante una operación booleana es extraído el volumen de control que representa el fluido al interior del canal, posteriormente se lleva a cabo el proceso de mallado donde es discretizado el volumen de control con lo que se procede la configuración de las condiciones de frontera y parámetros de operación del canal para luego realizar la simulación computacional CFD y finalmente lograr la toma de datos y poder así realizar la comparación entre el método analítico y computacional de la demanda de aire-agua que se experimenta en el canal hidráulico estudiado.

1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con el fin de llevar a cabo la menor cantidad de simulaciones posibles sin perder fiabilidad en los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto es implementado un diseño de experimentos (DOE) tipo factorial completo 2^k donde serán evaluadas las variables de presión de entrada, ángulo de descarga y apertura de compuerta en dos puntos de operación cada uno (nivel alto y bajo), adicionalmente se implementa un punto centro que permitirá determinar curvatura en los resultados obtenidos y facilitar la creación de un modelo matemático simplificado del fenómeno estudiado.



Implementando un diseño factorial completo tipo 2^k es posible determinar la interacción entre las variables al variar todos los parámetros a la vez en cada corrida que se realiza del estudio, aunque esto puede llevar a un número mayor de corridas en el caso de estudio

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

de éste proyecto es totalmente viable ya que sólo disponemos de tres variables de interés, conociendo la interacción entre las mismas podremos determinar de manera clara y concisa la incidencia del ángulo de descarga en la demanda de aire experimentada por el canal hidráulico.

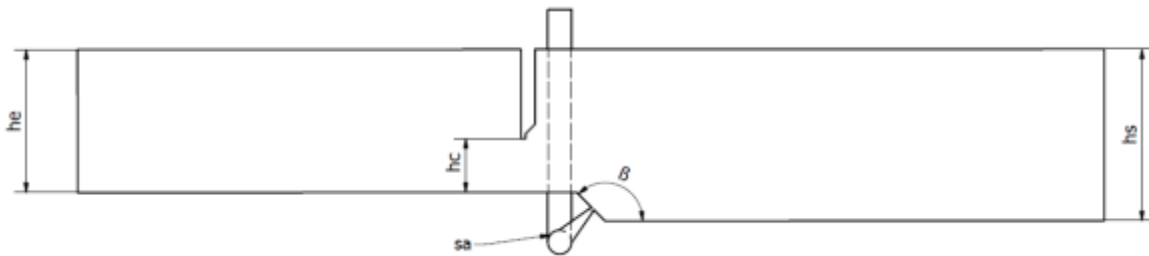
Corrida	A	B	C	D = AB	E = -AC	F = -BC
1	-	-	-	+	-	-
2	+	-	-	-	+	-
3	-	+	-	-	-	+
4	+	+	-	+	+	+
5	-	-	+	+	+	+
6	+	-	+	-	-	+
7	-	+	+	-	+	-
8	+	+	+	+	-	-

Número de la simulación	Condiciones de operación		
	Presión (atm)	Apertura (%)	Ángulo (°)
1	7,2	60	45
2	7,2	60	90
3	7,2	25	45
4	7,2	25	90
5	1,2	60	45
6	1,2	60	90
7	1,2	25	45
8	1,2	25	90
9	4,2	42,5	67,5


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

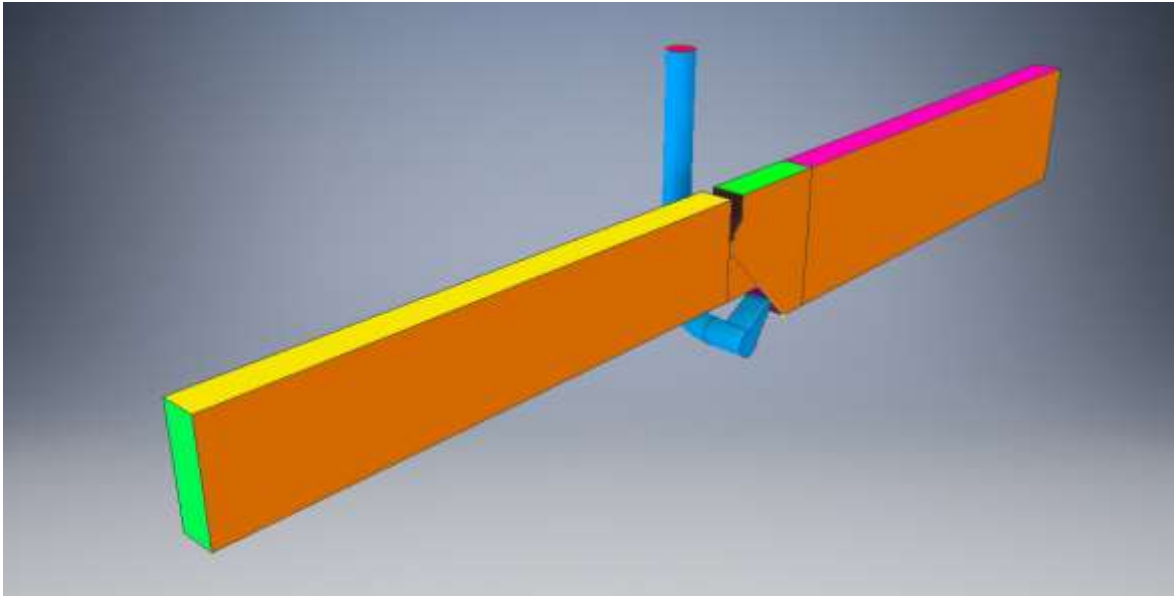
2. DISEÑO DEL CANAL HIDRÁULICO

Buscando reducir el costo computacional necesario para llevar a cabo las simulaciones computacionales se realiza la simplificación de la geometría real del canal de descarga, adicionalmente se establece el ángulo de interés que permitirá determinar la incidencia de la geometría en la demanda de aire del conducto hidráulico, en términos generales el fluido se desplaza de izquierda a derecha pasando inicialmente por la tubería a presión que contiene la columna de agua aguas arriba de la compuerta, la compuerta vertical de regulación de caudal que permite controlar el caudal que va aguas debajo de la misma, el sistema de aireación que permite igualar las presiones internas del canal con la atmosférica evitando así cavitación dentro del conducto, el escalón de descarga y finalmente el canal de superficie libre de descarga.



Parted del canal hidráulico	
Cota	Descripción
he	Altura canal de entrada
hc	Apertura de compuerta
β	Ángulo de descarga
hs	Altura canal de salida
sa	Sistema de aireación

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



El volumen de control es diseñado y obtenido en Inventor 2018[®] donde se dimensiona a una escala que en una etapa posterior pueda ser construido y permita la validación experimental de los resultados obtenidos vía CFD.

3. MALLADO

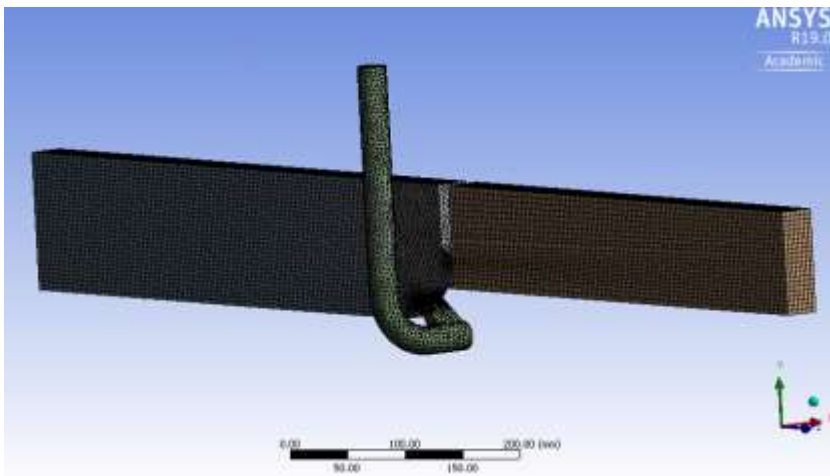
Uno de los requerimientos para desarrollar un análisis computacional utilizando métodos numéricos es la discretización del dominio, también llamado mallado, la fiabilidad de los resultados obtenidos por el método CFD dependerá en gran parte de la calidad del mallado que se tenga en la discretización del dominio, con base en estudios encontrados en la literatura se establece una independencia de malla en 80000 elementos arrojando una varianza menor al 2% en los resultados obtenidos al aumentar la cantidad de elementos, adicionalmente otros cuatro parámetros son evaluados, oblicuidad, calidad ortogonal, relación de aspecto y calidad de elemento. Los valores máximos, mínimos y promedios son mostrados en la siguiente tabla, la cual muestra condiciones suficientes para considerar válido el estudio realizado.

Geometría (Ángulo de descarga)

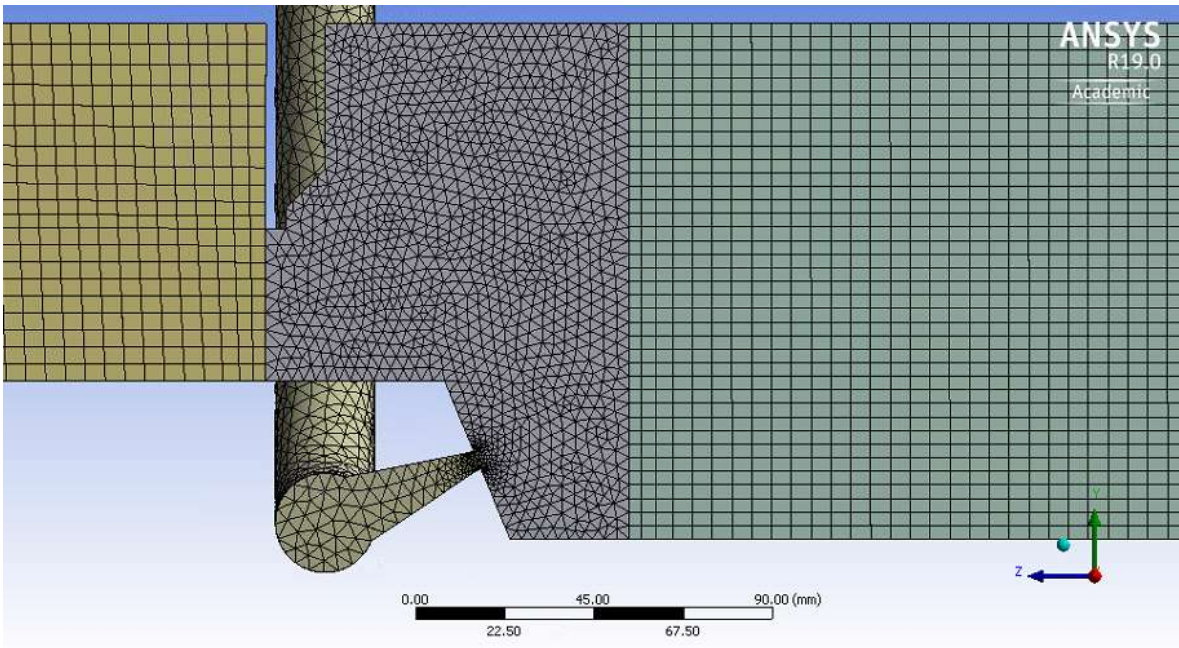
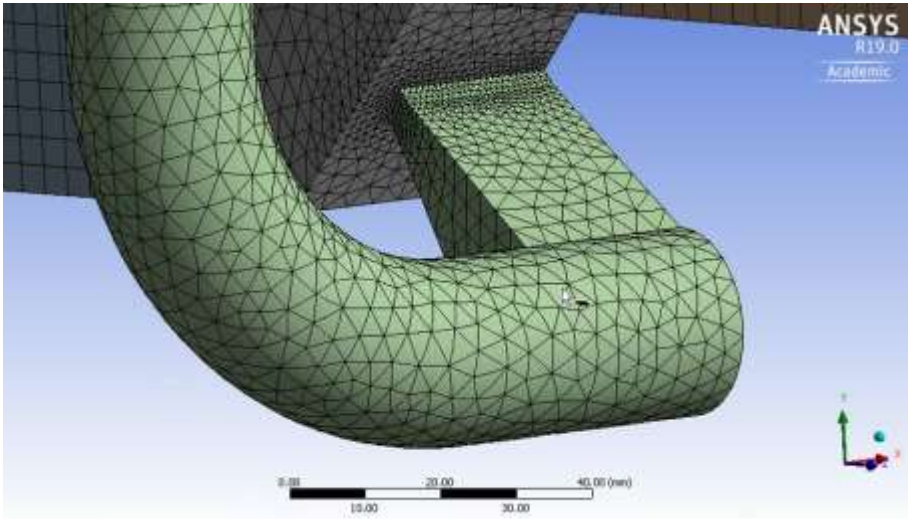
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Parámetro		45°	67,5°	90°
Elementos		101992	185803	127134
Nodos		280622	392135	322635
oblicuidad	Mínimo	1,31E-10	6,35E-06	1,31E-10
	Máximo	0,73385	0,79852	0,76266
	Promedio	0,13493	0,19128	0,17958
calidad ortogonal	Mínimo	0,26615	0,20148	0,23734
	Máximo	1	1	1
	Promedio	0,86518	0,81508	0,83878
calidad de aspecto	Mínimo	1,1723	1,0075	1,1092
	Máximo	6,6361	8,6742	8,0067
	Promedio	1,647	1,7405	1,8051
calidad de elemento	Mínimo	0,36528	0,25526	0,20769
	Máximo	0,99999	0,99999	0,99999
	Promedio	0,88027	0,85558	0,84391

Como ejemplo de mallado se muestra varias tomas de las diferentes mallas empleadas en el análisis de la incidencia geométrica en la demanda de aire-agua.



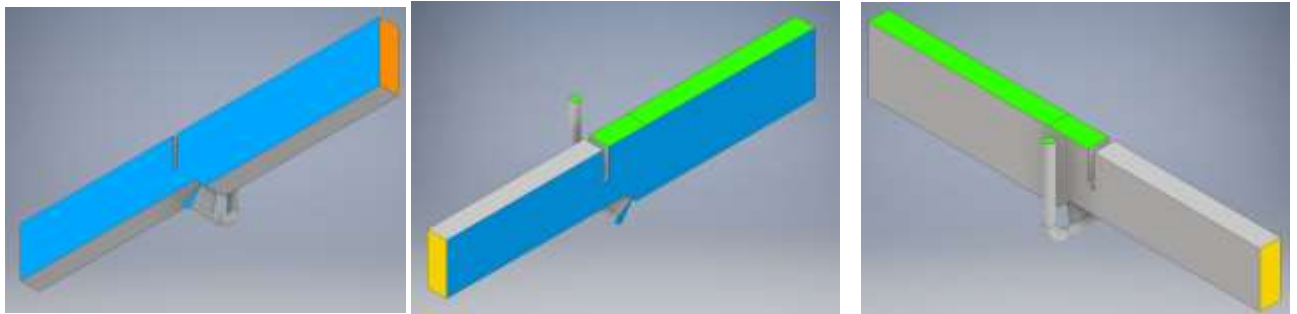
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



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

4. Condiciones de frontera

Es empleado un modelo multifásico de canal abierto transitorio configurado con un tiempo total de simulación que está entre 5 y 10 segundos con un timestep adaptativo que comienza en 0.0005 segundos, las fases usadas son aire y agua a 25°C a una presión de referencia de 1 atm con un coeficiente de tensión superficial de 0.073 N/m, es configurado el modelo volumen of fluid (VOF) como Sharp/ dispersed, el modelo de turbulencia empleado fue SST k-w, las condiciones de frontera se muestran a continuación.

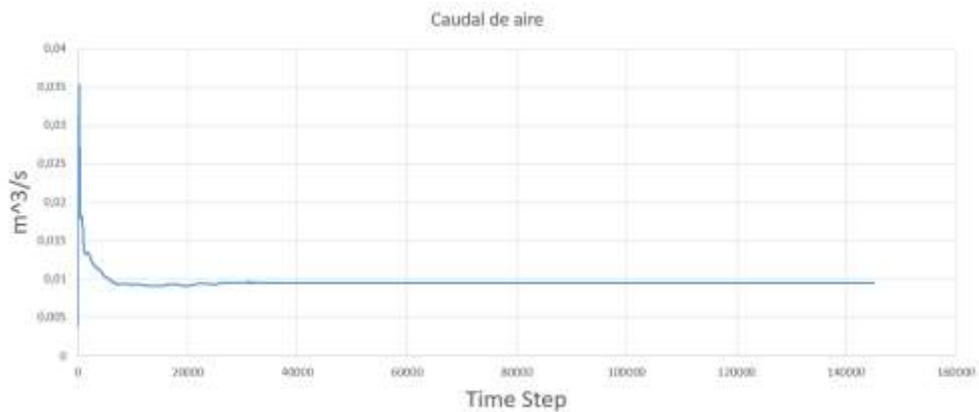


	simetría
	Entrada de aire
	pared
	salida
	Entrada de agua

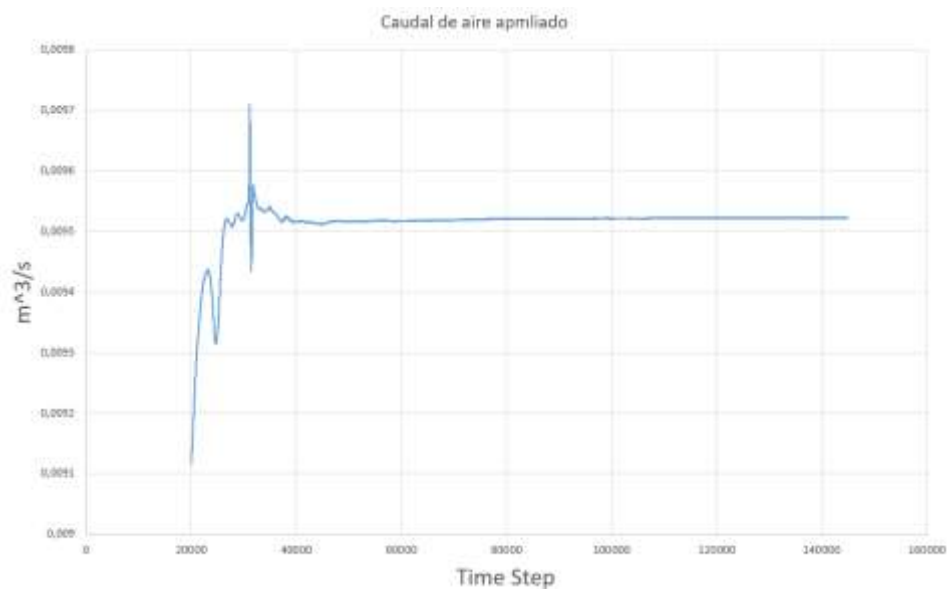
La gravedad es seteada en el eje $-Z$, con una magnitud de -9.81m/s^2 y como condiciones de inicialización se emplea aguas arriba de la compuerta fracción volumétrica de agua 100% y aguas debajo de la compuerta 0%.

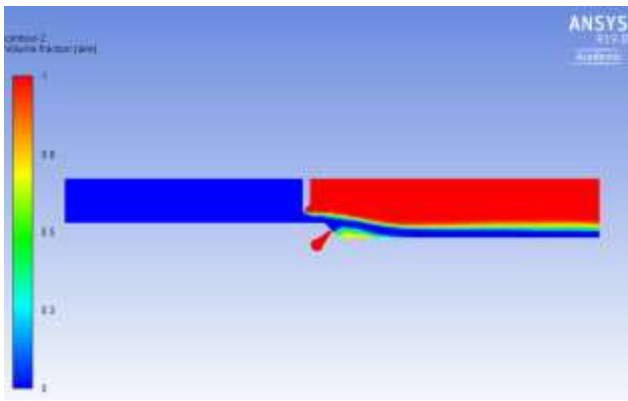
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en el grupo de figuras en ninguno de los casos se presenta retorno de agua por el sistema de aireación y se da la formación del salto hidráulico, adicionalmente todos los monitores de caudal de aire y agua utilizados se logran estabilizar teniendo el fluido en la última etapa en estado estacionario.

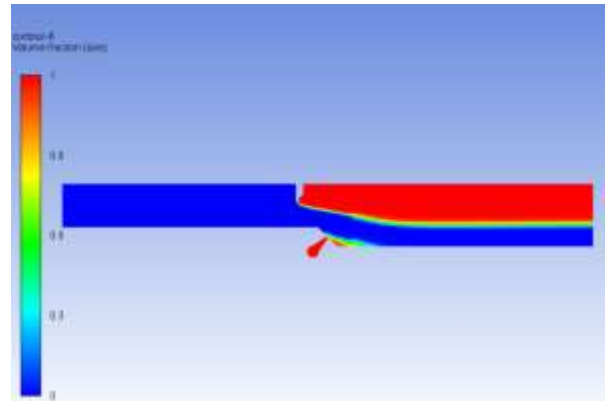


Monitor de aire en el sistema de aireación

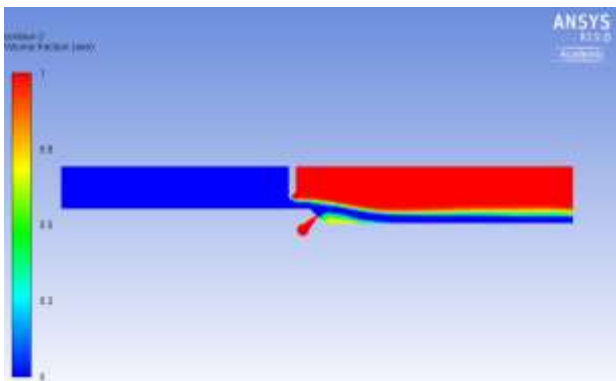




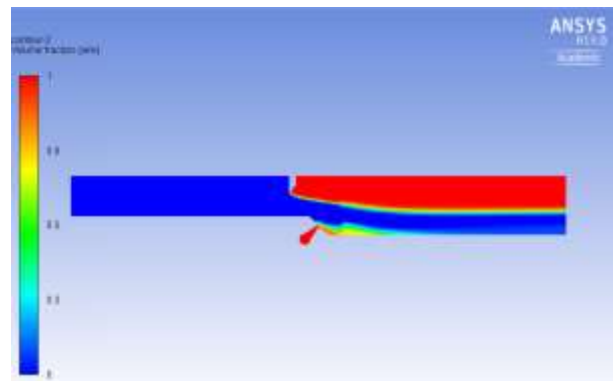
1.2 atm / $\alpha = 45^\circ$ / h = 25%



1.2 atm / $\alpha = 45^\circ$ / h = 60%

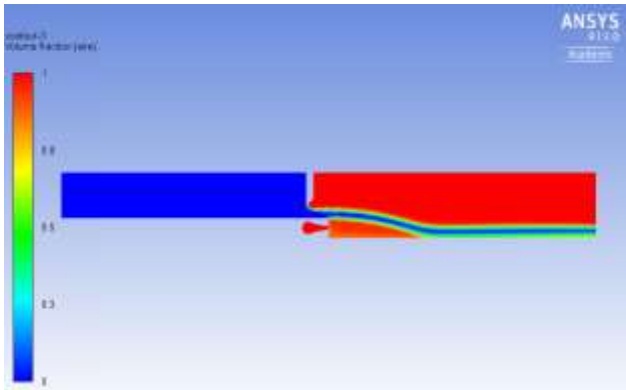


7.2 atm / $\alpha = 45^\circ$ / h = 25%

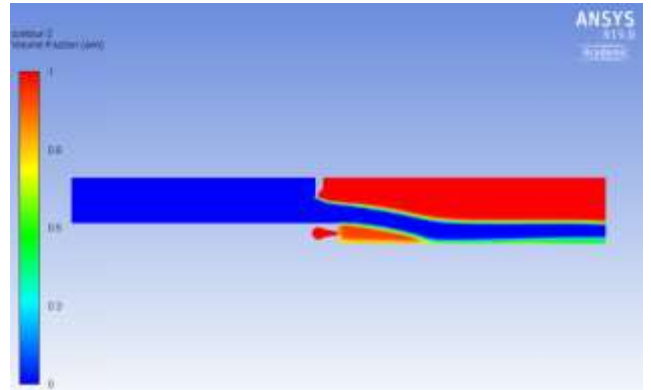


7.2 atm / $\alpha = 45^\circ$ / h = 25%

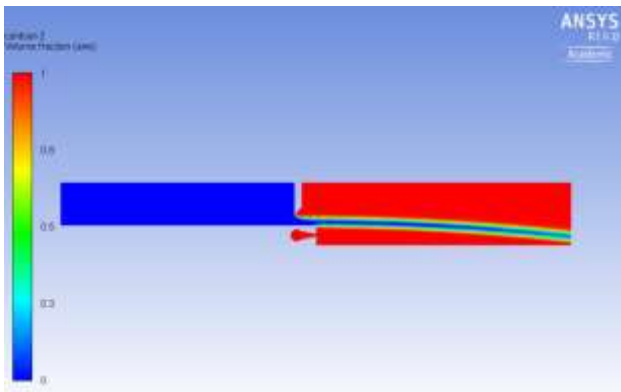
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



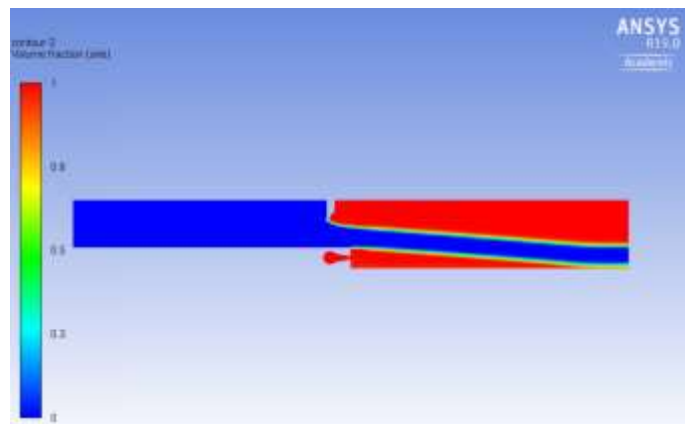
1.2 atm / $\alpha = 90^\circ$ / h = 25%



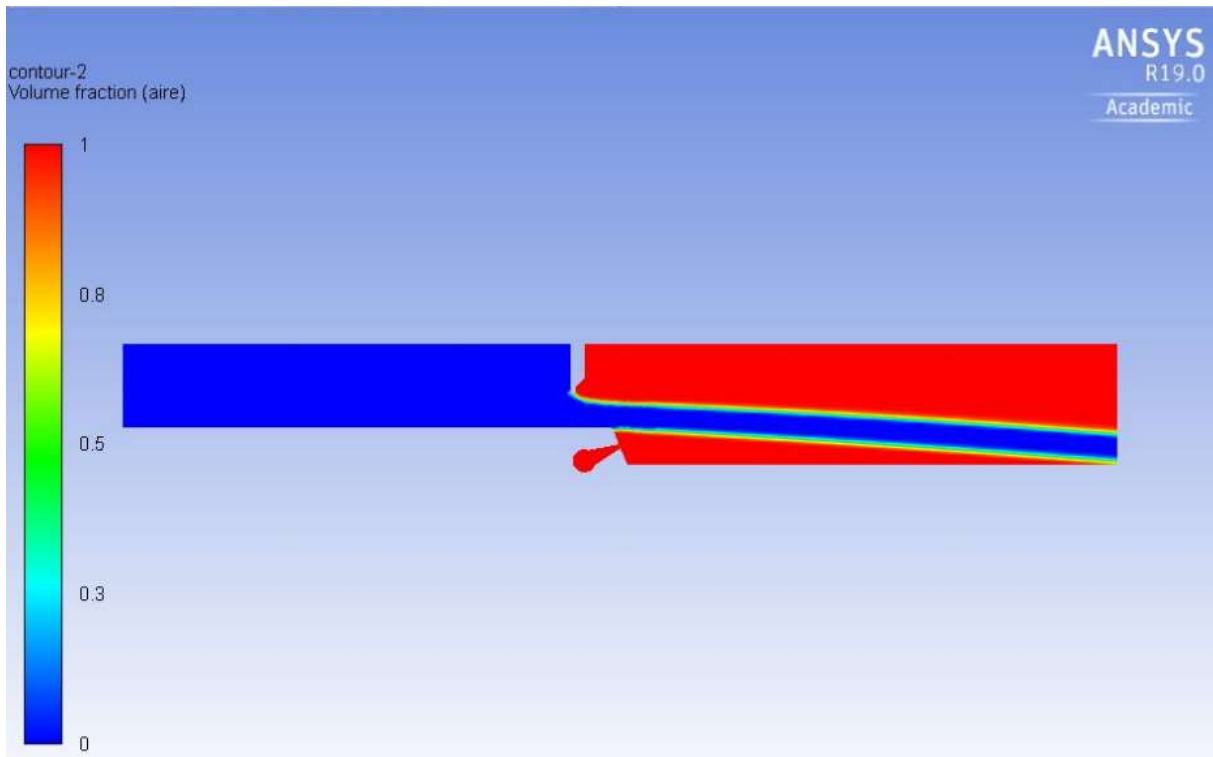
1.2 atm / $\alpha = 90^\circ$ / h = 60%



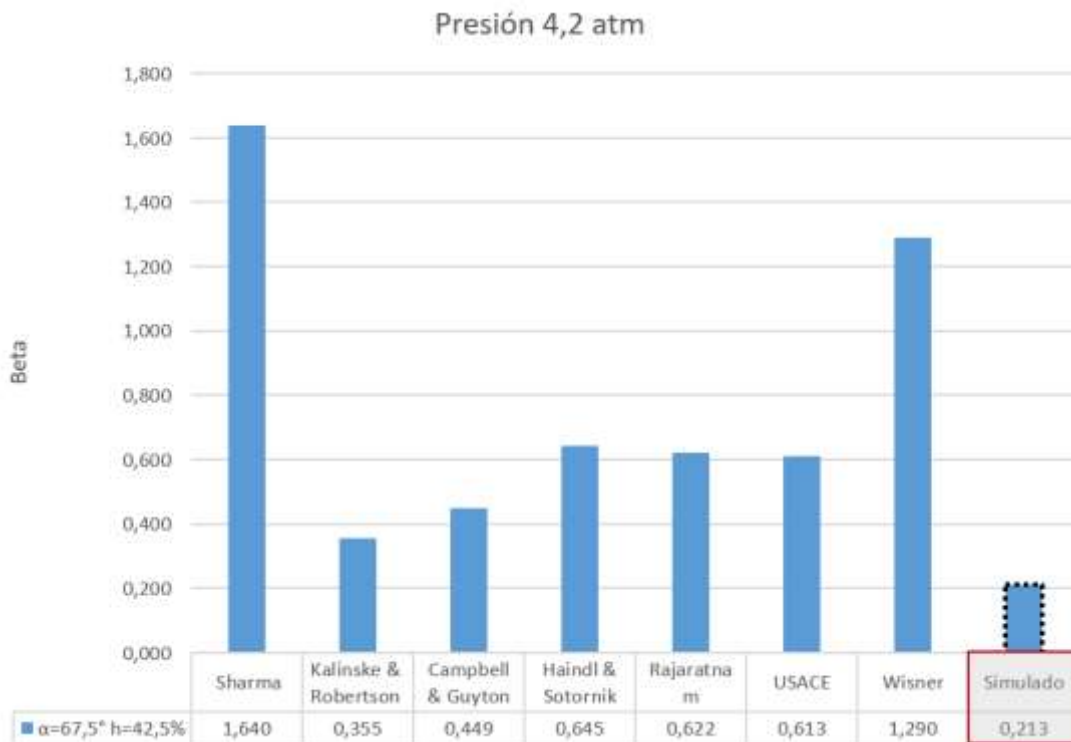
7.2 atm / $\alpha = 90^\circ$ / h = 25%



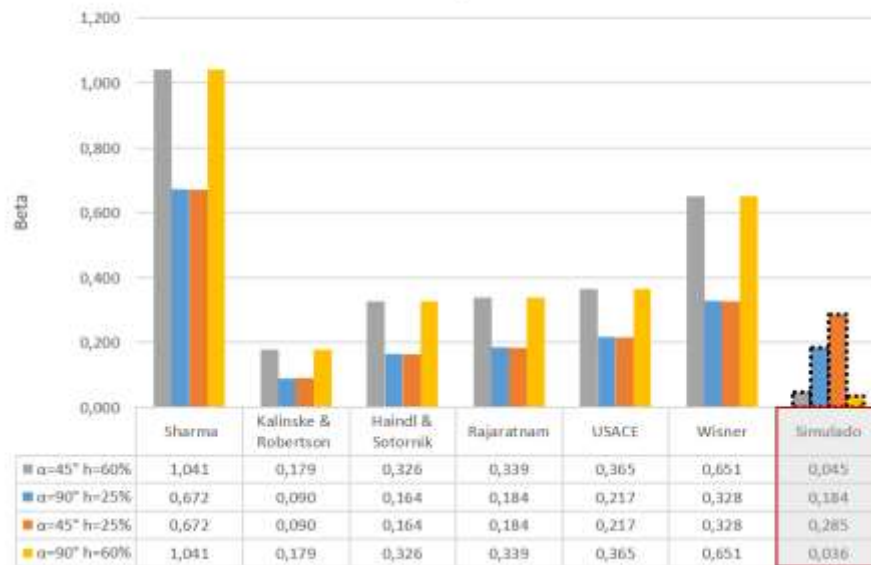
7.2 atm / $\alpha = 90^\circ$ / h = 60%



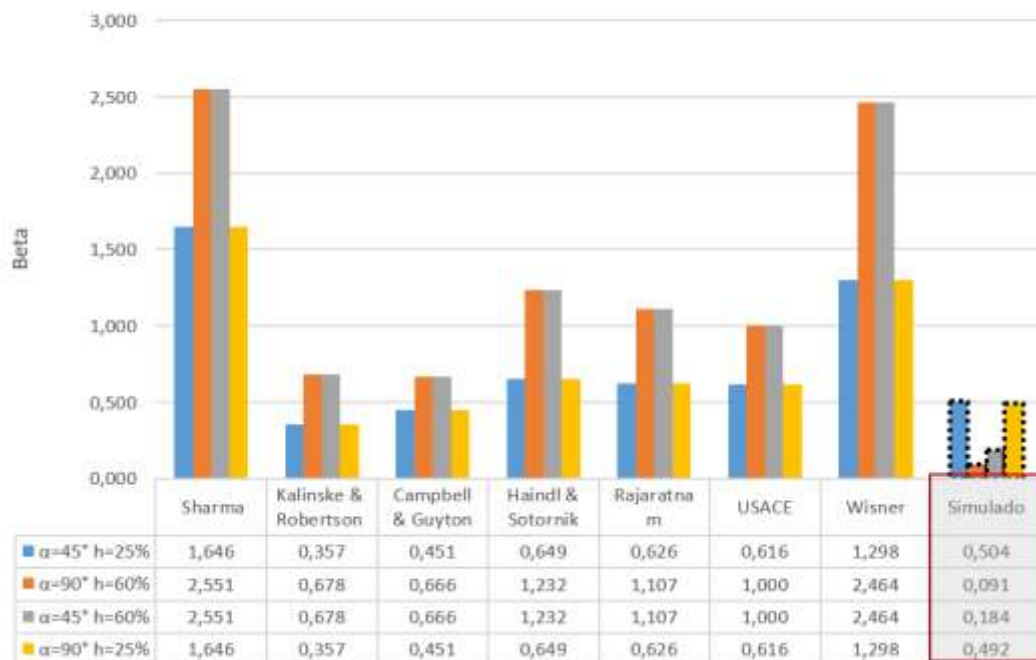
4.2 atm / $\alpha = 67.5^\circ$ / $h = 42.5\%$



Presión 1,2 atm



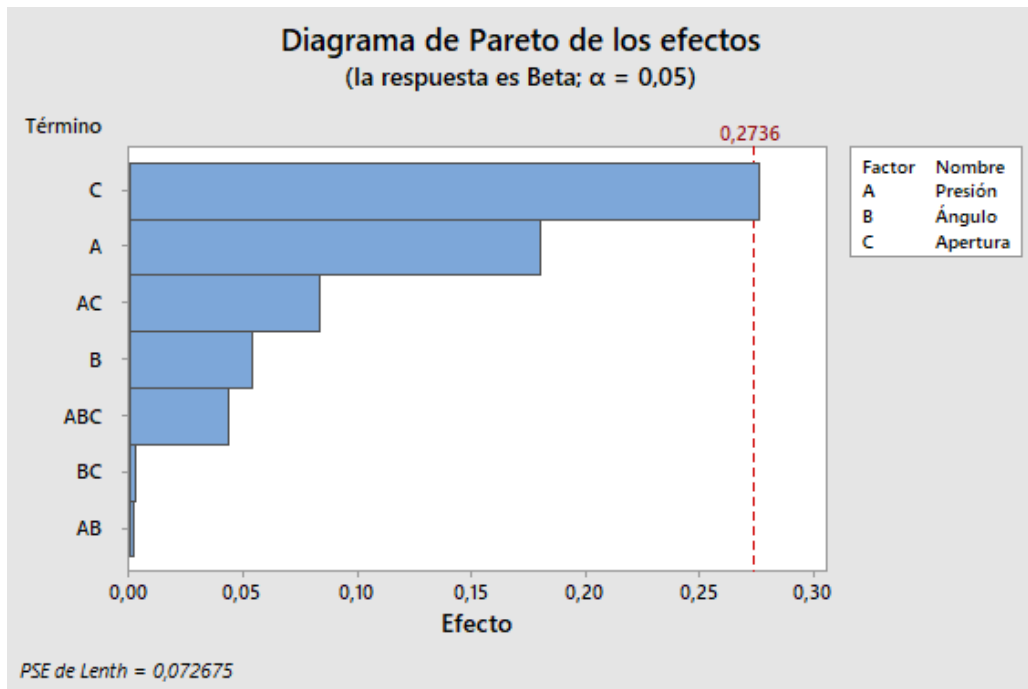
Presión 7,2 atm

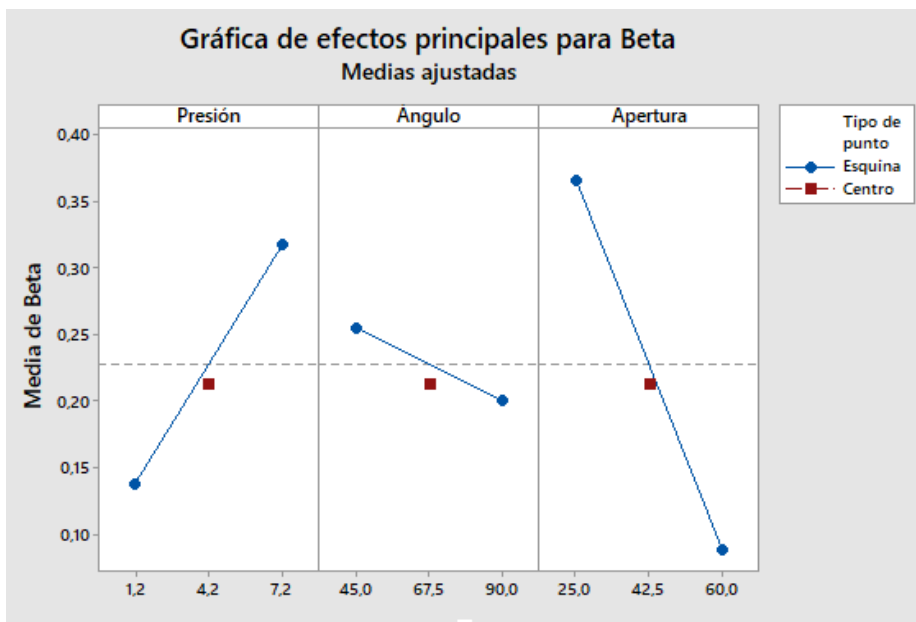
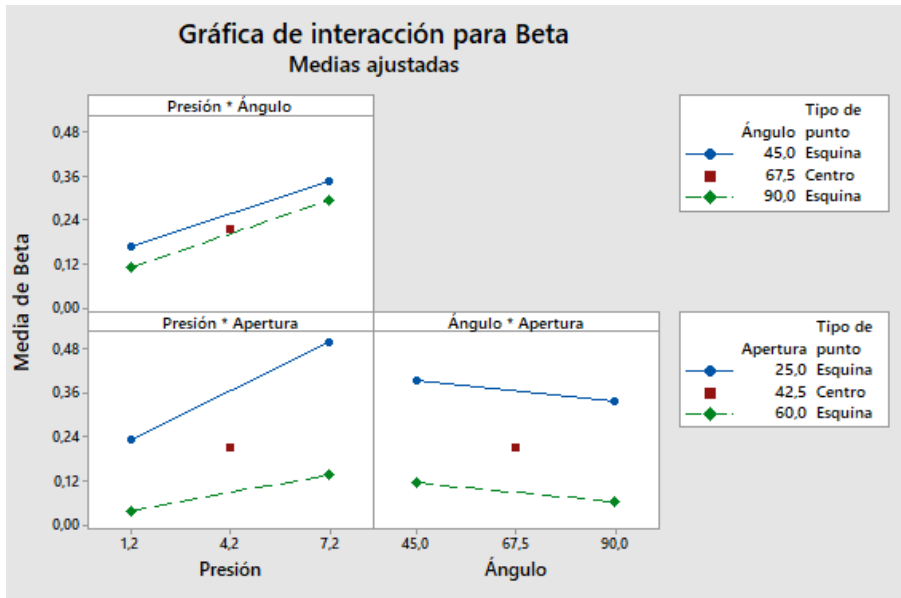


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En los casos donde se tuvo como condición de operación 1.2 atm de presión es obtenido un valor máximo en la demanda de aire analítico (Q_a/Q_w) de $\beta = 1,041$ a través de la *ecuación 1* frente a un valor máximo CFD de $\beta = 0.285$, valor aproximado al resuelto con la *ecuación de Stornick*, en condiciones de 7.2 atm de presión se alcanza con el método CFD un coeficiente $\beta = 0.504$ comparado con el máximo obtenido de la *ecuación de Sharma* de $\beta = 2.551$, asemejándose más al resuelto con la *ecuación de Guyton*, finalmente en una condición de operación intermedia de 4.2 atm de presión se presenta un beta obtenido por CFD de $\beta = 0.213$ y por método analítico el más cercano se establece en $\beta = 0.355$ originado en la *ecuación de Kalinske*.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO





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

- Por los resultados, se puede obtener la mejor correlación a utilizar en función de las condiciones de operación (Presión y apertura de compuerta) de los modelos empíricos establecidos en la literatura.
- CFD es una herramienta que permite determinar el comportamiento del fluido al interior de un canal de descarga de una central hidroeléctrica de gran magnitud, lo cual, debido a las características técnicas de operación y seguridad, no es factible realizar mediciones experimentales reales.
- Mediante implementaciones DOE se estableció la incidencia de los parámetros asociados al estudio (h , $\%$ y α) y su interacción conjunta en la determinación de la demanda de aire dentro del conducto, encontrando que el ángulo en la descarga no incide considerablemente en el funcionamiento del sistema de aireación.
- Como principal factor de incidencia en la determinación de la demanda de aire del conducto se encuentra el porcentaje de apertura de la compuerta vertical, seguido de la presión de trabajo e incluso más relevante que el ángulo de descarga, la interacción entre las ya mencionadas.
- En la figura 11 se observa como cada variable de manera independiente no presenta curvatura en la determinación del coeficiente β , sin embargo, en la figura xx la relación entre ángulo de descarga y apertura de la compuerta si la tiene, pero al ser una variable de poco efecto puede ser descartada dentro del análisis y caracterización de la demanda de aire.

REFERENCIAS

Almaini, R. M., & Shaymaa, M. T. (2010). Prediction Downpull Force on Tunnel Gate with Different Gate Lip Geometry .

Aydin, I. (2010). Prediction of downpull on closing high head gates Prediction of downpull on closing high head gates Calculs de l' abaissement de fermeture de vannes sous fortes charges.

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

Aydin, I., Telci, I. T., & Dundar, O. (2006). Prediction of downpull on closing high head gates. *Journal of Hydraulic Research*, 822–831.

Benjamín, J., Ccencho, L., (n.d.). *Compuertas Y Medición De Caudal*, 0–5.

Calderon Villegas, D. (2016). Estudio computacional de la hidrodinamica y del sistema de aireacion en descargas de fondo con una compuerta de alta presion, 96. Retrieved from.

Mendel, W. (2018). Air demand in gated tunnels – a Bayesian approach to merge various predictions Mohammad Reza Naja fi , Zahra Kavianpour , Banafsheh Naja fi , Mohammad Reza Kavianpour and Hamid Moradkhani, (October), 152–166.

(Oveson, (2008).)Mohagheg, A., & Wu, J. (2010). Hydraulics of discharge tunnel service gate : the flow regimes, 22(5).

Murray, R. I., & Simmons, W. P. (s.f.). *Hydraulic Downpull Forces on large Gates*.

Mvotma. (2011). *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Uruguay, 101. Retrieved

Oveson, D. P. (2008). *Air Demand in Free Flowing Gated Conduits* Committee Member.

Ozkan, F., Tuna, M. C., Baylar, A., & Ozturk, M. (2014). Optimum air-demand ratio for maximum aeration efficiency in high-head gated circular conduits. *Water Science and Technology*.

Palma, N. (2004). *Centrales hidroelectricas*. Centrales Hidroeléctricas, 1–41.

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

Pozo, D., Manzanares, M., & Cim, P. (2011). Modelación numérica de la aireación en desagües de fondo mediante el método de partículas y elementos finitos (PFEM).

Pozo, D., Salazar, F., & Toledo, M. Á. (2014). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería desagües de fondo de presas mediante el método de partículas y elementos finitos, 30(1), 51–59.

Salazar, F., Morán, R., Oñate, E., Toledo, M. A., & Riquelme, F. J. (2012). Numerical modeling of air-water interaction in bottom outlets . application to susqueda dam, 9–11.

Taylor, P., Aydin, I., Telci, I. T., & Dundar, O. (2010). Prediction of downpull on closing high head gates Prediction of downpull on closing high head gates Calculs de l' abaissement de fermeture de vannes sous fortes charges.

Yazdi, J., & Zarrati, A. R. (2011). An algorithm for calculating air demand in gated tunnels using a 3D numerical model. Journal of Hydro-Environment Research, 5(1), 3–13.

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

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

FIRMA ESTUDIANTES *Edwin Herrera Lyubelo c.c. 8029389.* _____

SEBASTIAN P.
cc. 1.026.830.778



FIRMA ASESOR *Jorge Sierra*
ENVÍO 1ª ENTREGA DE FDE089 _____

FECHA ENTREGA: 19-10-2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

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

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____