



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL FLUJO EN LOS CANGILONES DE UNA TURBINA PELTON MEDIANTE OPENFOAM.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN DISEÑO Y SIMULACIÓN

**SIMBAÑA CAIZA STALYN FABIAN**  
stalyn.simbana@epn.edu.ec

**DIRECTOR:**  
Ing. VICTOR HUGO HIDALGO DIAZ, D.sc.  
victor.hidalgo@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR:**  
Ing. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA, Ph.D.  
esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, junio 2022

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **SIMBAÑA CAIZA STALYN FABIAN**, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Víctor Hugo Hidalgo, D.Sc.**  
DIRECTOR

---

**Ing. Esteban Alejandro Valencia, Ph.D.**  
CODIRECTOR

# DECLARACIÓN

Yo, **Stalyn Fabian Simbaña Caiza**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Firmado electrónicamente por:  
**STALYN FABIAN  
SIMBANA CAIZA**

---

**Stalyn Fabian Simbaña Caiza**

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen del Quinche que  
con su divina presencia en mi vida  
han permitido que consiga  
este logro tan importante

A mis padres y hermana,  
por su amor y apoyo incondicional.

A mi amado sobrino Sebastián quien  
llego en el momento indicado  
para darnos luz.

Stalyn



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a la virgen del Quinche por darme la fortaleza necesaria para conseguir un logro más.

A mis padres y hermana por motivarme y apoyarme en cada una de mis metas y sueños por cumplir, por enseñarme a nunca rendirme a pesar de las adversidades que se presentan en el camino. Por su incondicional amor en cada etapa de mi vida.

A mi abuelita Margarita por velar por nuestra familia y siempre estar pendiente de mí, porque con su amor, enseñanzas y ejemplo he llegado cada vez más lejos.

A mi amada novia Taby por brindarme su cariño y respaldo durante esta nueva meta planteada.

A la Escuela Politécnica Nacional por la gran formación profesional y por brindarme grandes docentes en mi trayectoria estudiantil. Al proyecto PIGR-2003, por haber facilitado información de gran relevancia para desarrollar este trabajo de titulación.

De manera especial al DSc. Víctor Hidalgo, por su excelente guía, paciencia, tiempo y confianza prestada para poder culminar este trabajo.

Stalyn

# ÍNDICE

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>i</b>
<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>iv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
1.1. Situación energética del Ecuador.....	4
1.2. Central Hidroeléctrica “Illuchi N°2” de ELEPCO S.A.....	6
1.3. Trabajos previos sobre turbinas Pelton en CFD.....	7
1.4. Turbinas Pelton .....	9
1.4.1. Principios de operación de la turbina Pelton.....	11
1.4.2. Ecuación de Euler para turbomáquinas .....	11
1.4.2.1 Teorema del momento cinético.....	11
1.4.2.2 Potencia transferida al rodete .....	13
1.4.2.3 Ecuación de Euler .....	13
1.4.3. Conversión de energía hidráulica en energía mecánica.....	14
1.4.4. Especificaciones geométricas de las turbinas Pelton .....	17
1.4.5. Principales fenómenos que producen daño en los cangilones de una turbina Pelton .....	19
1.5. Dinámica de fluidos computacional.....	20
1.5.1. Ecuaciones de Gobierno.....	20
1.5.2. Discretización del volumen de control - Mallado.....	21
1.5.3. Criterio de Courant Friedrich Levy .....	23
1.5.4. Discretización de ecuaciones diferenciales. ....	23
1.5.5. Proceso de solución de ecuaciones algebraicas y algoritmo de acoplamiento.....	24

1.5.6. Modelo de turbulencia.....	25
1.6. Software libre y de código abierto OpenFOAM.....	26
1.6.1. OpenFOAM.....	26
1.6.2. Utilidades de OpenFOAM.....	27
1.6.3. Movimiento del dominio rotacional.....	28
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>30</b>
2.1. Estructura del Caso OpenFOAM.....	30
2.2. Modelo geométrico 3D de la turbina Pelton.....	31
2.2.1. Modelo geométrico AMI.....	32
2.2.2. Modelo geométrico ACMI.....	32
2.3. Desarrollo y generación de la malla.....	33
2.3.1. Mallado del dominio computacional AMI.....	34
2.3.2. Mallado del dominio computacional ACMI.....	35
2.3.3. Estudio de independencia y calidad de malla.....	36
2.4. Preprocesamiento del caso en OpenFOAM.....	36
2.4.1. Condiciones de operación Turbina Pelton.....	36
2.4.2. Condiciones de borde e iniciales.....	37
2.4.3. Propiedades del fluido de trabajo.....	39
2.4.4. Modelo de turbulencia.....	40
2.4.5. Configuración del movimiento de la malla AMI y ACMI.....	40
2.5. Simulación numérica en OpenFOAM.....	44
2.5.1. Configuración del solver interFOAM.....	45
2.5.2. Control de simulación.....	46
2.5.3. Características del Software/hardware y calculo en paralelo.....	47
2.6. Post-Procesamiento y Validación de resultados.....	48
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>48</b>
3.1. MALLADO.....	48
3.1.1. Análisis de Independencia de Malla.....	48

3.1.2. Calidad de la malla.....	50
3.2. Convergencia y estabilidad .....	51
3.2.1. Simulación numérica – AMI .....	51
3.2.2. Simulación numérica – ACMI.....	53
3.3. Comparación y validación del Torque máximo en la simulación AMI y ACMI.....	54
3.4. Comportamiento del fluido sobre los cangilones.....	55
3.5. Comparación de tiempo y recursos computacionales.....	57
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
4.1. Conclusiones .....	58
4.2. Trabajos futuros .....	59
<b>5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
ANEXO I .....	64
ANEXO II.....	74
ANEXO III.....	75
ANEXO IV.....	76
ANEXO V.....	77
ANEXO VI.....	78
ANEXO VII.....	79
ANEXO VIII.....	80
ANEXO IX.....	81
ANEXO X.....	84
ANEXO XI.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 a) Potencia nominal y b) Potencia efectiva en distintas fuentes energéticas con corte hasta el mes de octubre 2021.....	4
Figura 1.2 Energía facturada a nivel nacional. ....	5
Figura 1.3 Turbina Pelton de eje vertical con 6 inyectores.....	10
Figura 1.4 Partes de una turbina Pelton. ....	10
Figura 1.5 Velocidad de la partícula de agua en los canales del rodete (a) Plano meridional y (b) Plano horizontal. ....	12
Figura 1.6 Representación del triángulo de velocidades en un corte trasversal de la cuchara. ....	15
Figura 1.7 Curva característica de eficiencia hidráulica del sistema con un ángulo de salida $\beta_2 = 180$ .....	17
Figura 1.8 Especificaciones de los parámetros geométricos de la turbina Pelton. ....	18
Figura 1.9 Efectos de la hidro-abrasión en los cangilones de la turbina Pelton. ....	19
Figura 1.10 Desgaste hidro-abrasivo en el rodete Pelton. ....	20
Figura 1.11 Zona móvil en dominios computacionales de turbinas hidráulicas.....	28
Figura 1.12 Operación de la interfaz deslizante. ....	29
Figura 2.1 Metodología CFD. ....	30
Figura 2.2 Estructura y descripción del directorio del caso AMI & ACMI en OpenFOAM. ....	31
Figura 2.3 Dominio geométrico utilizado en el enfoque AMI. ....	32
Figura 2.4 Dominio geométrico utilizado en el enfoque ACMI.....	33
Figura 2.5 Detalle de los refinamientos y layers de la malla AMI. ....	34
Figura 2.6 Detalle de los refinamientos y layers de la malla ACMI. ....	35
Figura 2.7 Límites seteados en el dominio AMI.....	37
Figura 2.8 Límites seteados en el dominio ACMI. ....	37
Figura 2.9 Configuración del fichero <i>dynamicMeshDict</i> . ....	40
Figura 2.10 Interfaces de acoplamiento AMI y ACMI. ....	40
Figura 2.11 Modificación de los patches AMI1 and AMI 2.....	41
Figura 2.12 Modificación de los patches ACMI1/2_couple and ACMI1/2_blockage. ....	41
Figura 2.13 Generación de cellSets. ....	42
Figura 2.14 Generación de la malla final. ....	43
Figura 2.15 Unión de mallas mediante <i>mergeMesh</i> . ....	43
Figura 2.16 Tratamiento de interfaces ACMI. ....	44
Figura 3.1. Independencia de malla AMI. ....	49

Figura 3.2. Independencia de malla ACMI. ....	49
Figura 3.3. Yplus sobre la pared del cangilón A2 a 20° , 45° y 60°. ....	51
Figura 3.4. Residual inicial y final de la simulación numérica con el enfoque AMI.....	52
Figura 3.5. a) Gráfica del N. Courant y b) Gráfica de residual de continuidad del enfoque AMI. ....	52
Figura 3.6. Residual inicial y final de la simulación numérica con el enfoque ACMI. ..	53
Figura 3.7. a) Gráfica del N. Courant y b) Gráfica de residual de continuidad del enfoque ACMI.....	53
Figura 3.8. Comparación y validación de resultados.....	54
Figura 3.9. Ubicación del cangilón A2. ....	55
Figura 3.10. Contornos de $\alpha_{water} = 0.8$ para el caso AMI y ACMI.....	56
Figura 3.11. Contornos de $\alpha_{water} = 0.8$ con distribución de presión en el caso AMI y ACMI.....	56
Figura 3.12. Contornos de $\alpha_{water} = 0.8$ con distribución de velocidad en el caso AMI y ACMI.....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Centrales Hidroeléctricas ELEPCO S.A. ....	6
Tabla 1.2 Especificaciones técnicas turbina Pelton “Illuchi N°2” .....	7
Tabla 1.3 Modelos de turbulencia.....	25
Tabla 1.4 Herramientas utilizadas de OpenFOAM. ....	27
Tabla 2.1 Detalle de mallas desarrolladas en el estudio AMI y ACMI. ....	36
Tabla 2.2. Condiciones iniciales. ....	38
Tabla 2.3 Resumen de las condiciones de borde para el caso AMI y ACMI. ....	38
Tabla 2.4 Resumen de las condiciones de borde para el caso AMI y ACMI. ....	39
Tabla 2.5. Propiedades del fluido. ....	39
Tabla 2.6. Configuración de <i>fvSchemes</i> .....	45
Tabla 2.7. Resumen de los parámetros de ejecución de la simulación.....	47
Tabla 3.1. Independencia de malla caso AMI.....	49
Tabla 3.2. Independencia de malla caso ACMI. ....	50
Tabla 3.3. Calidad de malla casos AMI y ACMI. ....	50
Tabla 3.4. Comparación y Validación de resultados. ....	54
Tabla 3.5. Comparación de recursos computacionales.....	58

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para estudiar las turbinas tipo Pelton utilizando el software CFD libre y de código abierto OpenFOAM, desde dos alternativas de análisis con los métodos AMI y ACMI para un estudio en estado transitorio bifásico. Algunos trabajos previos fueron utilizados para partir de un modelo 3D base y con la información extendida por la Central Hidroeléctrica “Illuchi N°2” se logró obtener un modelo más adecuado. OpenFOAM ofrece una gama extensa de herramientas que están en continuo desarrollo de las cuales hemos tomado varias que nos han permitido construir estos casos de estudio de forma óptima a pesar de la complejidad que es estudiar una turbomaquinaria. Finalmente, una vez desarrollados los dos casos de estudios para AMI y ACMI se procedió a comparar algunos de los resultados como mallas, perfiles de velocidad, presión, contornos y finalmente el torque generado sobre uno de los cangilones. La simulación para ambos casos fue desarrollada con el solver interFoam empleando el modelo de turbulencia  $k - \omega SST$  y se adiciono un fichero el cual nos permite calcular todas las fuerzas sobre el cangilón intermedio. Los resultados obtenidos para la simulación nos arrojaron que el torque generado para ambos estudios es similar y la variación con el dato real es del 4 a 6% que es un valor aceptable, además es claro que la simulación se llevó a un menor tiempo para el caso de ACMI.

**Palabras clave:** ACMI, AMI, cangilones, interFOAM, OpenFOAM, Turbina Pelton.



## ABSTRACT

In the present work, a methodology was developed to study Pelton-type turbines using the free and open source CFD software OpenFOAM, from two analysis alternatives with the AMI and ACMI methods for a two-phase transient state study. Some previous works were used to start from a base 3D model and with the information extended by the “Illuchi N°2” Hydroelectric Power Plant, a more adequate model was obtained. OpenFOAM offers an extensive range of tools that are in continuous development, from which we have taken several that have allowed us to build these case studies optimally despite the complexity of studying a turbomachinery. Finally, once the two case studies for AMI and ACMI were developed, some of the results were compared, such as meshes, velocity profiles, pressure, contours and finally the torque generated on one of the buckets. The simulation for both cases was developed with the interFOAM solver using the  $k - \omega SST$  turbulence model and a file was added which allows us to calculate all the forces on the intermediate bucket. The results obtained for the simulation showed us that the torque generated for both studies is similar and the variation with the real data is 4 to 6%, which is an acceptable value, it is also clear that the simulation took less time for the ACMI case.

**Keywords:** ACMI, AMI, buckets, interFOAM, OpenFOAM, Pelton Turbine.

# **ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL FLUJO EN LOS CANGILONES DE UNA TURBINA PELTON MEDIANTE OPENFOAM.**

## **INTRODUCCIÓN**

Según el Balance Nacional de Energía Eléctrica realizado en julio de 2021 en Ecuador, las centrales hidroeléctricas representan el 58,06% de la potencia nominal y el 64,60% de potencia efectiva del total de generación eléctrica[1] . En Latinoamérica y el Caribe se estima que la demanda eléctrica crecerá entre 2.7% y 3.6% anualmente hasta el 2040 [2]. Las turbinas tipo Francis, Pelton y Kaplan, destacan por su alto uso comercial, en particular para este estudio nos enfocaremos en las turbinas tipo Pelton la misma que puede capturar hasta el 95% de la energía del agua [3]. La turbina Pelton puede aprovechar saltos de más de 1000[m], posee una gran eficiencia de carga parcial baja a la vez que tiene una menor afectación con respecto al fenómeno de cavitación. Sin embargo, a altas velocidades de funcionamiento presenta mayores tasas de erosión [4]. En Ecuador, el crecimiento del sector energético basado en la creación y repotenciación de centrales hidroeléctricas ha sido notable debido a su alta eficiencia, bajo impacto ambiental y generación de oportunidades de empleo. En el sector rural se han instalado varias pequeñas centrales hidroeléctricas de entre 500 KW a 1MW siendo estos uno de los sectores más beneficiados del país y que en su mayoría se han instalado turbinas tipo Pelton [5], [6]. Basado en los datos antes mencionados la tecnología de generación eléctrica se direcciona a desarrollar métodos más eficientes y económicos para cubrir las futuras demandas, por lo que es preciso promover el desarrollo de esta tecnología en el país como una gran oportunidad para crecimiento de varios sectores industriales.

Por otro parte, el uso de software comercial suma un porcentaje considerable en el costo de proyectos de investigación en la industria hidroeléctrica, petrolera, entre otras. Por lo cual es necesario desarrollar o hacer uso de herramientas tecnológicas de licencia abierta con la finalidad de abaratar costos y generar conocimiento a través del desarrollo de casos de estudio especializado. Una de las herramientas CFD más utilizadas en la actualidad con licencia GPL (General public Licence) es OpenFOAM, este software multifísico permite modelar varios fenómenos e implementar nuevos métodos matemáticos que se ven involucrados en la resolución de las ecuaciones de transporte.

En base a lo mencionado, se define la necesidad de desarrollar el estudio sobre la turbina Pelton, mediante una metodología de análisis desde los enfoques AMI y ACMI,

como base para futuras investigaciones acerca de los efectos del flujo en los cangilones de dicha turbina.

En el presente trabajo se ha tomado un modelo optimizado de cangilón basado en un modelo CAD y condiciones de trabajo de una turbina Pelton de la empresa ELEPCO S.A [7], el mismo que será simulado dentro del marco de trabajo OpenFOAM. La finalidad de este es evaluar el comportamiento del flujo sobre los cangilones, la cantidad de recurso computacional requerido utilizando métodos de transferencia de datos entre mallas estacionaria y dinámica para determinar una metodología más eficiente con resultados confiables.

El presente estudio se encuentra enmarcado dentro del proyecto PIGR -20-03, el mismo que consiste en el diseño y construcción de un prototipo de rodete polimérico para turbinas hidráulicas tipo Pelton, ideado como una alternativa económica y viable para micro centrales de generación eléctrica en el país.

## **Objetivo general**

Estudiar numéricamente el comportamiento dinámico del flujo en los cangilones de una turbina Pelton mediante OpenFOAM.

## **Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte acerca de turbinas tipo Pelton y su estudio mediante el software OpenFOAM.
- Obtener un modelo 3D de la geometría de estudio en base al modelo desarrollado previamente de la turbina de ELEPCO S.A.
- Realizar las mallas híbridas 3D para estudio del estado transitorio del flujo en el dominio estacionario y rotatorio en base a los métodos de transferencia de datos en la interfaz.
- Simular los modelos obtenidos en estado transitorio usando OpenFOAM.
- Validar los resultados de manera cuantitativa y cualitativa con datos obtenidos en el estado del arte.
- Analizar los resultados para definir los modelos y métodos más eficientes para simulación de turbinas Pelton en OpenFOAM.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Situación energética del Ecuador

Durante los últimos años se han ejecutado importantes obras en el sector eléctrico ecuatoriano, encaminadas a garantizar el abastecimiento eléctrico, a través del desarrollo de recursos energéticos locales y priorizando la participación de las energías renovables, especialmente la hidroeléctrica, con el fin de ayudar a la diversificación de la matriz energética y disminuir sustancialmente el consumo de combustibles fósiles [8]. El Balance Nacional de Energía presentado en octubre del 2021 por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) informa que: el 58.06% (5098.75 [MW]) del total de potencia nominal y el 64.60% (5255.68 [MW]) del total de potencia efectiva en Generación de Energía Eléctrica se producen en centrales hidroeléctricas. El 88.71% del total de energía eléctrica entregada al servicio público (23233.67 [GWh]) también corresponde al sector hidroeléctrico [7].

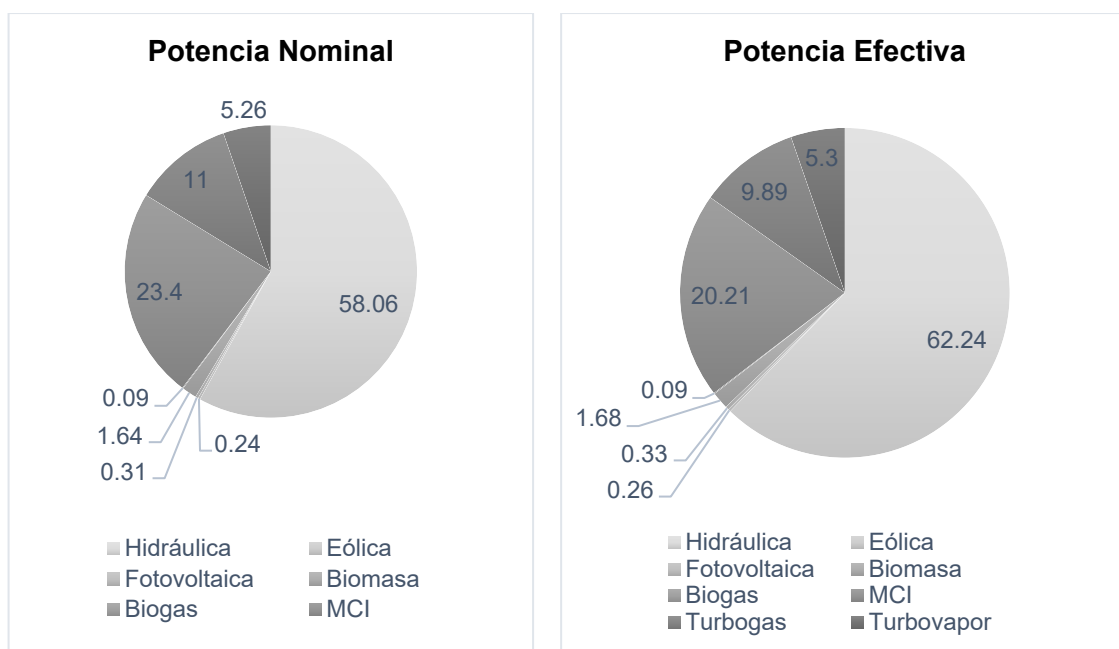


Figura 1.1 a) Potencia nominal y b) Potencia efectiva en distintas fuentes energéticas con corte hasta el mes de octubre 2021.  
(Fuente: Propia)

La Figura 1.1 indica que el 39.65% y 35.40% de la potencia nominal y efectiva respectivamente generada corresponde al uso de fuentes no renovables (Térmica MCI, Turbo gas y Turbo vapor), mientras que, el 60.35% y 64.60% restante de la potencia nominal y efectiva respectivamente pertenece a fuentes renovables (Hidráulicas, Eólicas, Fotovoltaica, Biomasa, Biogás) [1]. La generación en centrales hidroeléctricas

es 1.76 veces mayor a la generada por el total de fuentes no renovables y cubre el 96.34% del total de la energía eléctrica renovable.

Respecto al consumo total de energía eléctrica, el sector residencial es el más representativo, seguido del industrial y del comercial con 7960.26 GWh (35.06%), 5579.69 GWh (24.58%) y 3686.48 GWh (16.24%) respectivamente. En cuanto a la demanda no regulada y otras ventas, le corresponde el 7,08% del consumo total que representa pérdidas que se producen por los efectos físicos ocasionados por la electricidad en los elementos y equipos del sistema, gestiones deficientes, o por fraude al existir conexiones ilegales por parte de los usuarios, en anteriores balances esta energía se consideraba dentro del grupo Industrial. En Otras ventas se incluye la energía entregada a usuarios ubicados en las fronteras de países vecinos, servidos mediante redes de distribución [1].

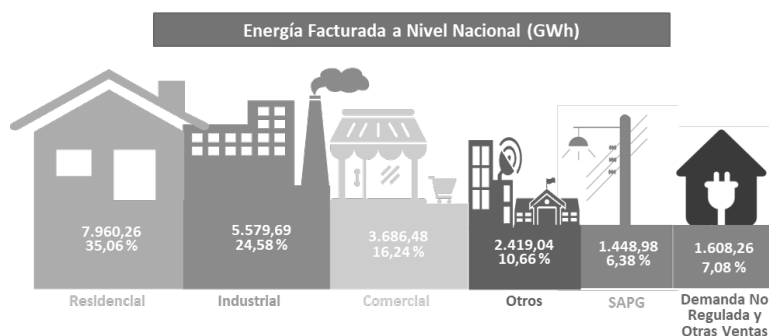


Figura 1.2 Energía facturada a nivel nacional.  
(Fuente: (BNEE)-octubre 2021 [1])

Globalmente existen aproximadamente 82 891 pequeñas centrales hidroeléctrica (PCH) o están en construcción, este número en los próximos años podría triplicarse si se aprovecha toda la capacidad de generación. Los números mencionados han sido posibles y tienen una buena visión debido a que las políticas sobre el aprovechamiento de los recursos renovables han sido favorables y ha producido un aumento importante en el apoyo e inversión en este tipo de centrales [9].

Para el 2022 según en Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2022 se tienen planificado construir alrededor de 25 proyectos hidroeléctricos que en total suman 4.2 [GW] de capacidad instalada, junto con la instalación de algunos proyectos de tipo solar, eólico y otras fuentes renovables no convencionales, todo esto con el fin de alcanzar uno de los objetivos de mencionado plan que es alcanzar el 60% de participación de fuentes de energía renovable en la capacidad energética del País [10].

En el año 2020, según ARCONEL [11] la cobertura eléctrica nacional no está al 100%, lo que convierte a las PCH en una alternativa para suplir esta necesidad en las zonas de difícil acceso.

En base a los antecedentes expuestos sobre la realidad energética del Ecuador y la importancia de sector hidroeléctrico en la misma es necesario generar desarrollo tecnológico y científico para el aprovechamiento de las fuentes hidrológicas y optimización de las centrales existentes de generación eléctrica.

## 1.2. Central Hidroeléctrica “Illuchi N°2” de ELEPCO S.A

La Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi S.A (ELEPCO S.A) es la institución encargada de generar y distribuir energía eléctrica en las zonas urbana y rural de los cantones: Pangua, La Maná, Pujilí, Sigchos, Latacunga, Saquisilí y Salcedo ubicados en la Provincia de Cotopaxi. Esta institución cuenta con 5 centrales de generación hidroeléctrica, con las que en el año 2019 se logró la cobertura del 97.53% en el área de concesión [8]. En la Tabla 1.1 se observan las centrales manejadas por ELEPCO SA. Se observa que la central “Illuchi N°2” construida en el año 1987 presenta la mayor capacidad instalada en generación.

Tabla 1.1 Centrales Hidroeléctricas ELEPCO S.A.

Central Hidroeléctrica	Capacidad [MVA]
Illuchi N°1	5.24
Illuchi N°2	6.50
El Estado	2.12
Catazacon	1.00
Angamarca	0.38

(Fuente: Propia)

La central “Illuchi N°2” está compuesta por 2 turbinas de tipo “Pelton” cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 1.2. Esta turbo maquinaria hace uso del agua liberada tras el proceso de generación de la central “Illuchi N°1” que se encuentra a una mayor altura sobre el nivel del mar. Tras el proceso de generación en “Illuchi N°1” el fluido es almacenado en un reservorio, desde el que es conducido mediante una red de tuberías hacia la central “Illuchi N°2”, aprovechando el recurso hídrico y la energía potencial en este [10].

Tabla 1.2 Especificaciones técnicas turbina Pelton “Illuchi N°2”.

<b>Turbina</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>
Fabricante	Teodoro Bell & Cia.	
Año	1979	1979
Cabeza de Altura [m]	348	327
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	0.878	0.95
Numero de inyectores	2	2
Potencia [kW]	2848	2675
Velocidad [rpm]	720	720
Velocidad de embalamiento [rpm]	1320	1320
Número de cangilones	21	21

(Fuente: Propia)

### 1.3. Trabajos previos sobre turbinas Pelton en CFD

En el primer semestre del 2018 se da inicio al proyecto junior PIJ 17-13 titulado “Investigación y evaluación de modelos de cavitación-erosión aplicados a la prevención de daños en turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas del Ecuador” bajo el aval de la Escuela Politécnica Nacional. Bajo los objetivos del proyecto se han desarrollado múltiples trabajos de titulación de pregrado y postgrado que ayudarían al mejoramiento de las operaciones diarias de las centrales hidroeléctricas del país, las cuales son enunciadas a continuación brevemente.

Inicialmente los estudios previos dentro del proyecto se han centrado en análisis sobre las turbinas Tipo Francis que operan en el país. El primer estudio de postgrado fue desarrollado en 2018 por Mora [12], cuyo trabajo se centró en analizar la eficiencia de una turbina Francis de la central hidroeléctrica “San Francisco”, en la ciudad de Baños de Agua Santa, provincia Tungurahua. Para el desarrollo del estudio se realizó un proceso de ingeniería inversa de la turbina para obtener modelos 3D CAD, los cuales posteriormente fueron utilizados para desarrollar la simulación numérica en el software CFD ANSYS CFX. Como resultados se obtuvo un error menor al 10% entre los valores simulados y experimental, una vez validada la simulación se puede evaluar otros parámetros de interés acorde a los distintos elementos de la turbina que podrían ayudar a mejorar su eficiencia.

A continuación, Guascal y Quispe en su trabajo de postgrado en el año 2019 [13], realizaron un estudio en el cual se optimizó la geometría realizada por Mora [12], logrando desarrollar en el nuevo dominio una malla estructurada a diferencia del estudio inicial. Esto permitió tener un mayor control en los resultados, obteniendo una mayor estabilidad en las variables de interés en las secciones de transición como son el rodete



y los álabes directores. Como resultado gracias a la metodología desarrollada para obtener la malla estructurada el tiempo de cálculo computacional decreció en un 33% y se obtuvo un estimado de la eficiencia general con un error menor al 5%.

Posteriormente, Velasco en su trabajo de pregrado en el año 2020 [14], desarrollo una metodología para estudiar turbinas Francis utilizando el software de código abierto OpenFOAM, dentro del estudio se tomó la malla estructurada desarrollada por Guascal [13] y se optimizo con la finalidad de mejorar el proceso de cálculo y menorar el uso de recursos computacionales. Las simulaciones fueron desarrolladas en estado estable inicialmente para validar los resultados y posterior se calibro un caso en estado transitorio, ambos casos usaron la técnica de transferencia de datos entre mallas MRF. Como resultado de la simulación en estado estable se logró capturar el fenómeno con un error del 5.02% para el caso de potencia al usar el caudal máximo. En el caso del transitorio la captura del fenómeno fue parcial.

Paralelamente a los estudios desarrollados sobre turbinas Francis los cuales dieron grandes conocimientos sobre el análisis estable e inestable en turbomaquinaria, Sarmiento [15] en marzo del 2020, propuso una metodología para el diseño de turbinas tipo Pelton mediante un estudio paramétrico el cual fue validado con datos reales de la Central Hidroeléctrica "Illuchi N°2". Partiendo de los datos de operación y su eficiencia actual mediante un análisis de rangos y ecuaciones que involucran parámetros sensibles al comportamiento de la turbina se ha logrado obtener los ángulos para la máxima eficiencia hidráulica y la ubicación optima de los cucharones en el rodete de la turbina Pelton.

Barragán y Parra [7] en junio del 2020, proponen una optimización de la geometría de un rodete tipo Pelton para flujo particulado utilizando simulación numérica en ANSYS-CFX, el estudio inicia con la obtención del modelo geométrico mediante ingeniería inversa del cangilón el cual es procesado con el software Rhino6 y posteriormente con algunos software CAD para la conformación de todo el dominio computacional es decir el dominio móvil y fijo, después de la obtención del modelo inicial se desarrollaron los modelos Mod1 y Mod2 optimizados en base a los ángulos de entrada y salida del chorro y la relación B/L, a cada estudio se le incluyo un análisis de partículas abrasivas que permitió analizar las zonas erosionadas. Con los cambios propuestos se obtuvieron un aumento en la eficiencia de 7.12% y 0.23% para Mod1 y Mod2 respectivamente.

Álvarez [16] en noviembre 2020, propone un estudio paramétrico de ángulos directrices y triángulos de velocidades de la cuchara de la turbina Pelton para la generación de

energía eléctrica a pequeña escala, el estudio usa como parámetros importantes el ángulo de muesca, el ángulo divisor y el ángulo de salida, que son variables propias de la superficie interna del cangilón. El código de optimización fue desarrollado en Python donde los resultados analizados fueron velocidades periférica, absoluta y relativa de partículas de flujo y su efecto sobre la eficiencia hidráulica de la turbomaquinaria. Como resultado se determinó que el ángulo de la muesca contribuye con mayor eficiencia parcial que el ángulo divisor, y además que un diseño incorrecto del ángulo de salida provoca las únicas caídas de eficiencia hidráulica al considerar flujo sin fricción.

En el primer semestre del 2021 se da inicio al proyecto grupal PIGR 20-03 titulado "Diseño y construcción de un prototipo de rodete polimérico para turbinas hidráulicas tipo Pelton, ideado como una alternativa económica y viable para micro centrales de generación eléctrica en el país" bajo el aval de la Escuela Politécnica Nacional. Bajo los objetivos del proyecto se han desarrollado múltiples investigaciones que están en proceso que ayudarían al estudio del comportamiento del fluido y efectos erosivos de las partículas sobre las cucharas de la turbina Pelton.

Rygg [17] en 2013 presenta uno de los trabajos pioneros en el estudio CFD de turbinas Pelton mediante la herramienta OpenFOAM y su finalidad es compararlo con estudios desarrollados mediante el software ANSYS CFX, estos dos fueron validados con datos experimentales. El estudio utiliza un solver InterDyMFoam el cual está inmerso actualmente en el solver interFOAM, la característica principal del estudio es el uso de mallas móviles entre un estator y rotor, y su método de transferencia de datos en la interfaz que es el método AMI. Los resultados no fueron los esperados y el tiempo de simulación fue excesivo de casi treinta veces mayor a Ansys CFX.

Según el estudio del estado del arte publicado por Zidonis [18] en el año 2015 acerca de la modelación numérica de turbinas Pelton evidencia que la simulación en este tipo de turbomaquinaria ha sido llevada a cabo por más de 20 años, sin embargo, en el artículo se menciona que hasta el momento solo existe un estudio en OpenFOAM, la cual se menciona anteriormente desarrollado por Rygg [17]. Por otro lado, el mayor número de trabajos sobre CFD en turbinas Pelton son desarrollados en CFX o Fluent pertenecientes al paquete comercial ANSYS.

## **1.4. Turbinas Pelton**

En la naturaleza, la energía hidráulica es un tipo de energía renovable utilizable que se puede convertir directamente en energía mecánica. En muchos países, la energía hidráulica será la principal fuente para producir energía eléctrica. Debido a la forma en

cómo se presenta los recursos hidráulicos en la naturaleza: como agua fluendo en un río o agua almacenada en embalses, existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas para generar energía eléctrica a partir de estos recursos [17], [19].

Entre varios tipos de turbinas hidráulicas, la turbina Pelton Figura 1.3, es probablemente la más utilizada a nivel mundial y fue inventada por Lester Allan Pelton en 1879. La turbina es utilizada en zonas montañosas donde el agua disponible se encuentra almacenado en embalses o lagos, la carga de altura requerida para su óptimo funcionamiento debe ser superior a los 600 [m] por encima de la turbina y un caudal bajo. Su generación puede variar desde el orden de los vatios hasta 400 [MW] [19].

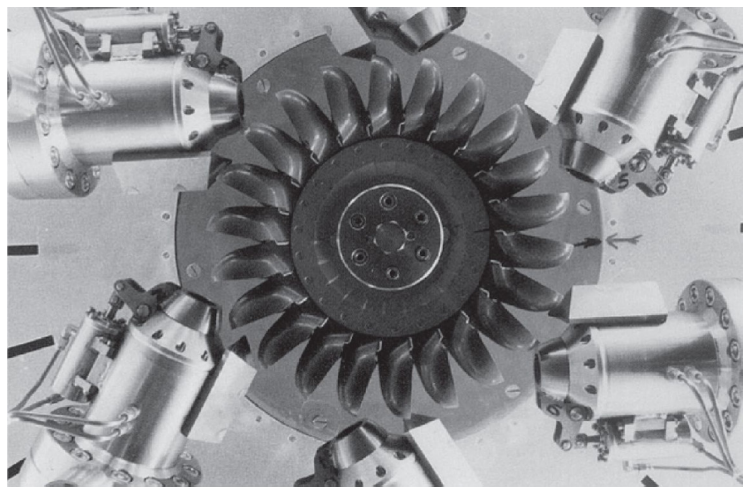


Figura 1.3 Turbina Pelton de eje vertical con 6 inyectores.  
(Fuente: [20])

La turbina es apreciada por su amplia área de eficiencia, que se debe a sus capacidades de variación del número y regulación de la apertura de las toberas. La Figura 1.4 muestra las distintas partes que conforman una turbina Pelton.

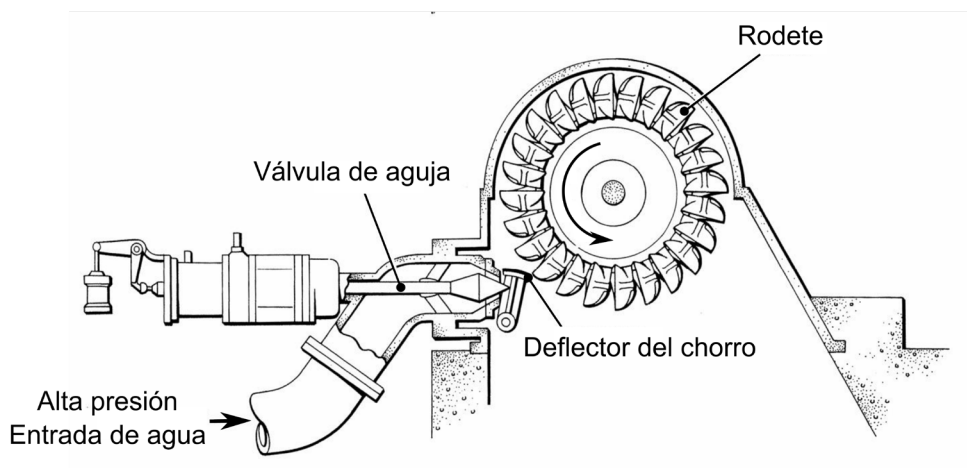


Figura 1.4 Partes de una turbina Pelton.  
(Fuente: Laboratorio de turbomaquinaria [21])

### 1.4.1. Principios de operación de la turbina Pelton

Una turbina Pelton consta de un rotor, en cuya periferia se montan cucharas dobles hemisféricas o elipsoidales ubicados por igual. El agua se transfiere desde una fuente de altura elevada a través de una tubería a presión que está equipada con una boquilla, a través de la cual el agua fluye a un chorro de alta velocidad. Una aguja que se mueve dentro de la boquilla controla el flujo de agua y, al mismo tiempo, proporciona un flujo suave con una pérdida de energía insignificante. Toda la energía potencial disponible se convierte así en energía cinética antes de que el chorro golpee las cubetas del rodete. La presión en toda la rueda es constante e igual a la atmosférica, por lo que la transferencia de energía se produce debido a la acción puramente impulsiva [21]. El rendimiento de la turbina depende de muchos factores, uno de ellos es la forma del chorro que golpea la cubeta de la turbina, forma del cangilón, entre otros [22].

La tecnología de turbinas Pelton se divide en hidromecánica y mecánica estructural. Ambas categorías representan un amplio espectro de tecnologías de punta y comprenden todos los aspectos técnicos y de ingeniería, como la eficiencia, la confiabilidad y la vida útil. Así, por un lado, se debe lograr la máxima eficiencia hidráulica en el diseño del perfil de la cuchara, mientras que, por otro lado, se debe garantizar la integridad del material y su vida útil [19].

### 1.4.2. Ecuación de Euler para turbomáquinas

#### 1.4.2.1 Teorema del momento cinético

Debido a la interacción de una partícula de agua sobre la superficie de una turbina, se da lugar a una acción recíproca. La partícula es desviada de su dirección inicial, este cambio en su momento induce una presión sobre las superficies de los alabes y provoca una rotación, generando un torque sobre el eje de la turbina. Es posible determinar la reacción de rotor sobre la partícula de agua en condiciones de operación estables [20]. A partir del teorema del momento cinético aplicado a una partícula fluida con la expresión (1):

$$\mathbf{T} = \frac{d}{dt}(\mathbf{r} \times m\mathbf{c}) \quad (1)$$

La ley expresa que la tasa de variación total del momento angular de la partícula fluida es igual al momento de las fuerzas externas que ejercen una influencia o una acción sobre él [20].

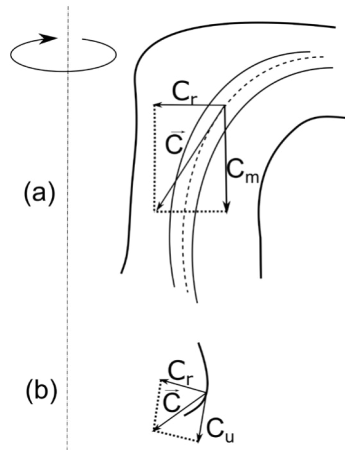


Figura 1.5 Velocidad de la partícula de agua en los canales del rodete (a) Plano meridional y (b) Plano horizontal.  
(Fuente:[20] )

Considerando un canal giratorio, la ecuación (1) puede reescribirse, desarrollando los términos:

$$\mathbf{T} = \frac{d}{dt} \mathbf{r} \times m\mathbf{c} + \mathbf{r} \times \frac{d}{dt} (m\mathbf{c}) \quad (2)$$

Al ingreso del cada la partícula con una masa  $m$ , fluye con una velocidad  $\vec{c}$ , llevando una cantidad de movimiento  $m\mathbf{c}_I$  y a la salida del canal una cantidad de movimiento  $m\mathbf{c}_F$ . La velocidad tiene componentes radial, axial y tangencial denominadas,  $c_r$ ,  $c_z$  y  $c_u$  respectivamente. Además, la ecuación (2) puede reescribirse:

$$\mathbf{T} dt = d(m\mathbf{c}) \quad (3)$$

Integrando la ecuación (3) entre la entrada y la salida del canal se obtiene:

$$\mathbf{T}\Delta t = m((\mathbf{r} \times m\mathbf{c})_2 - (\mathbf{r} \times m\mathbf{c})_1) \quad (4)$$

El momento de las componentes  $c_r$  y  $c_z$  con respecto al eje de la turbina es cero. Por lo tanto, el momento de la velocidad  $\mathbf{c}$  está determinado únicamente por la componente  $c_u$ [20]. La variación de la cantidad de movimiento de la masa  $m$  durante el tiempo  $\Delta t$  es igual al producto de la cantidad de movimiento de las fuerzas motrices,  $T$ , y su acción durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ :

$$T\Delta t = m(r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1}) \quad (5)$$

donde  $r_1$  es el radio del centro de gravedad de la masa de agua a la entrada del canal y  $r_2$  es el radio del centro de gravedad de la masa de agua a la salida del canal. Introduciendo el flujo másico de partículas,  $Q$ ,

$$Q = \frac{m}{\Delta t} \quad (6)$$

La ecuación (5) se convierte en:

$$T = Q(r_2 c_{u_2} - r_1 c_{u_1}) \quad (7)$$

#### 1.4.2.2 Potencia transferida al rodete

La potencia transferida por la partícula de fluido al rodete se obtiene realizando el producto escalar del momento resultante  $T$  con la velocidad angular de la máquina  $\omega$  :

$$P = T \cdot \omega \quad (8)$$

Introduciendo la definición de la velocidad periférica  $U$  :

$$U = \omega \times r = r \times \omega \quad (9)$$

la expresión de la potencia, ecuación (8) se convierte en:

$$P = Q(U_1 c_{u_1} - U_2 c_{u_2}) \quad (10)$$

#### 1.4.2.3 Ecuación de Euler

La energía transferida de las partículas a la máquina está dada por:

$$E_m = (U_1 c_{u_1} - U_2 c_{u_2}) = \omega (r_1 c_{u_1} - r_2 c_{u_2}) \quad (11)$$

La ecuación (11), denominada ecuación de Euler fue encontrada por Leonard Euler en 1764, quien también fue el primero en probar la necesidad de un distribuidor, es decir, alabes guía, en las máquinas hidráulicas. La ecuación de Euler muestra que el momento transmitido al rodete es igual a la diferencia entre los momentos, a la entrada y a la salida del rodete, de un flujo másico  $Q$  de agua que fluye a través de la turbina por unidad de tiempo[20]. Tomando en cuenta que toda la energía disponible es tanto la energía mecánica como la energía que se pierda y esto se expresa así:

$$E = gH \quad (12)$$

Introduciendo la definición de la Ecuación (12) en la expresión (11) es posible obtener la ecuación de Euler en términos de cabeza de altura, como se expresa a continuación:

$$H = \frac{1}{g}(U_1 c_{u_1} - U_2 c_{u_2}) \quad (13)$$

Finalmente, se obtiene la eficiencia hidráulica en la maquina con la expresión:

$$\eta_h = \frac{1}{Hg}(U_1c_{u1} - U_2c_{u2}) \quad (14)$$

### 1.4.3. Conversión de energía hidráulica en energía mecánica

La diferencia de alturas desde el embalse hasta las turbinas se denota como carga hidráulica y es la forma en como las turbinas Pelton aprovechan esta energía potencial transformándola en energía cinética mediante uno o varios chorros de agua que impactan el rodete y lo hacen girar [19] . Asumiendo que no hay pérdidas, toda la energía potencial  $E_p$  es transferida como energía cinética  $E_k$  al rodete, por lo tanto, la velocidad teórica del chorro es:

$$E_k = E_p \quad (15)$$

$$mC^2 = mgH \quad (16)$$

$$C_o = \sqrt{2gH} \quad (17)$$

Donde  $H$  es la cabeza de altura neta en la entrada del inyector,  $g$  es la aceleración de la gravedad. La ecuación (15) es conocida típicamente como la fórmula de Torricelli.

Seguido a esta transformación la energía cinética se convierte en energía mecánica mediante la interacción entre el chorro y las cucharas giratorias del rodete. Inicialmente para un primer análisis se considera que la cuchara tiene un movimiento de traslación uniforme de velocidad constante en dirección de  $C_1$  como muestra la Figura 1.6. Esta suposición de movimiento rectilíneo significa que, durante la interacción entre el chorro y el balde, solo la fuerza impulsiva es efectiva[19].

Para el flujo a la entrada de la cuchara (índice 1) y con  $C_1 = C_o$ , la velocidad relativa entre el chorro y la cuchara en movimiento se denota por:

$$W_1 = C_1 - U_1 \quad (18)$$

Con la velocidad relativa  $W_1$ , el chorro de agua se esparce por toda la cuchara formando una lámina. El comportamiento del chorro al cruzar por la geometría de la cuchara provoca un aumento de presión en la misma y genera una fuerza impulsiva determinada por la ley de momento. En la superficie libre formada por el chorro en el momento del chocar con las cucharas están sometidas únicamente a una presión atmosférica y la velocidad del flujo es igual a  $W_1$  tomando en cuenta que se despreciaron las pérdidas en el sistema.

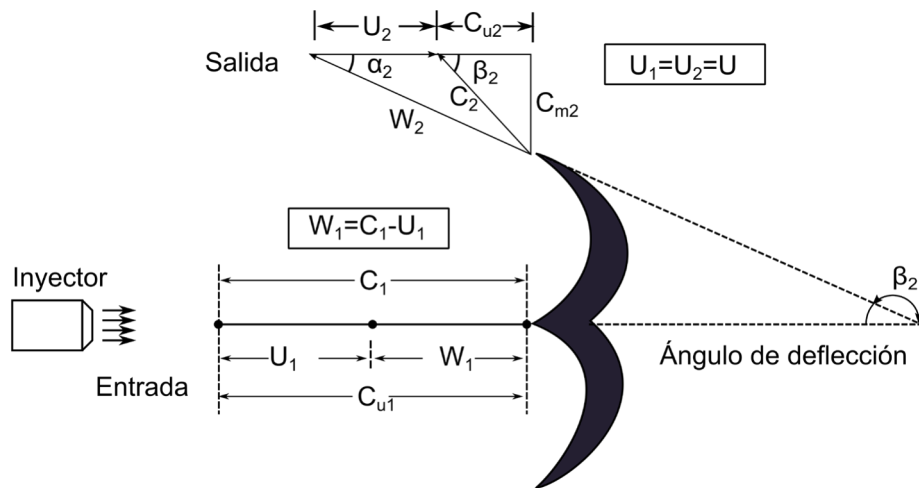


Figura 1.6 Representación del triángulo de velocidades en un corte transversal de la cuchara. (Fuente:[21] )

Después de que el fluido impacta con las cucharas este sale de la misma con un ángulo  $\beta_2$ , y a presión atmosférica. Luego, la velocidad relativa del fluido se restablece a su valor inicial de acuerdo con la ecuación (18), es decir,  $W_2 = W_1 = W$ . Por lo tanto, la velocidad absoluta se puede calcular mediante el triángulo de velocidades con la ley de cosenos y está dada por:

$$C_2^2 = U^2 + W^2 + 2UW \cos \beta_2 \quad (19)$$

Con la finalidad de conocer la fuerza impulsiva generada por el paso del fluido a través de la cuchara es necesario evaluar la diferencia de cantidad de movimiento entre la entrada y salida de la cuchara en movimiento. Esta fuerza en la dirección del movimiento del fluido se calcula mediante la expresión:

$$F_{cuchara} = \dot{m}_w(W_1 - W_2 \cos \beta_2) = \dot{m}_w W(1 - \cos \beta_2) \quad (20)$$

Donde  $F_{cuchara}$  es la fuerza ejercida por el chorro de agua sobre el cangilón. Además,  $\dot{m}_w = \rho W A_{jet}$  es el flujo masico en el marco relativo del movimiento de la cuchara. Este está relacionado con el flujo masico  $\dot{m}_c = \rho C_o A_{jet}$  en el marco absoluto de la siguiente manera:

$$\dot{m}_w = \frac{W}{C_o} * \dot{m}_c \quad (21)$$

Tomando en cuenta la ecuación (21), la fuerza impulsiva ejercida sobre la cubeta, dada en la ecuación (20), puede reescribirse como:



$$F_{cuchara} = \dot{m}_c \frac{W^2}{C_0} (1 - \cos \beta_2) \quad (22)$$

Por otro lado, al multiplicar la fuerza por la velocidad obtenemos la potencia recibida por la cuchara y se denota mediante:

$$P = F_{cuchara} U = \dot{m}_c \frac{W^2}{C_0} (1 - \cos \beta_2) \cdot U \quad (23)$$

El trabajo específico, realizado por su interacción con el balde en movimiento, está dado por:

$$e = UW(1 - \cos \beta_2) \quad (24)$$

El trabajo específico máximo se obtiene de  $de/dU = 0$  y de  $W = C_0 - U$  se obtiene:

$$\frac{U}{C_0} = 0.5 \quad (25)$$

$$e = \frac{1}{4} C_0^2 (1 - \cos \beta_2) \quad (26)$$

Esta relación representa la condición en la cual la turbina Pelton debe operar para obtener un máximo desempeño. La velocidad de salida del agua de la cuchara resulta de la ecuación (19) y de las expresiones de trabajo específico como:

$$C_2^2 = \frac{1}{2} C_0^2 (1 + \cos \beta_2) \quad (27)$$

De la ecuación (25) es evidente que el trabajo específico máximo se obtiene cuando el ángulo de flujo a la salida de la cuchara está configurado a  $\beta_2 = 180^\circ$ . Por lo tanto:

$$e = \frac{1}{2} C_0^2 \quad (28)$$

Esta expresión muestra que es igual a la energía cinética específica que está disponible en el chorro. La velocidad de salida es obtenida de la ecuación (27) como:

$$C_2 = 0 \quad (29)$$

Esto significa que la energía total almacenada en el chorro se transfiere por completo a la cubeta en movimiento.

En la práctica  $\beta_2 \neq 180^\circ$  y se ajusta a un valor aproximado a  $170^\circ$  debido a que es necesario que el chorro salga por los bordes y no impacte sobre la parte posterior de la

cuchara consecutiva. Por otro lado, la velocidad de salida  $C_2$  no puede ser cero porque el agua, después de pasar por la cuchara, tiene que salir volando por los bordes de la cuchara para dejar libre el camino a las siguientes cubetas [19].

La eficiencia hidráulica se define entonces como la relación entre el trabajo específico y la energía cinética específica en el chorro. De la ecuación (24), con  $W = C_0 U$ , obtenemos:

$$\eta_h = \frac{e}{\frac{C_0^2}{2}} = 2 \left(1 - \frac{U}{C_0}\right) \frac{U}{C_0} (1 - \cos \beta_2) \quad (30)$$

Si  $k = U/C_0$ , tenemos:

$$\eta_h = 2k(1 - k)(1 - \cos \beta_2) \quad (31)$$

En la Figura 1.7, se muestra la eficiencia hidráulica como una función de la relación de velocidad  $k$  para el ángulo de salida  $\beta_2 = 180^\circ$ . La eficiencia hidráulica máxima se obtiene cuando la velocidad del rodete es la mitad de la velocidad del chorro de agua en la entrada  $k = 0.5$ , y se expresa como:

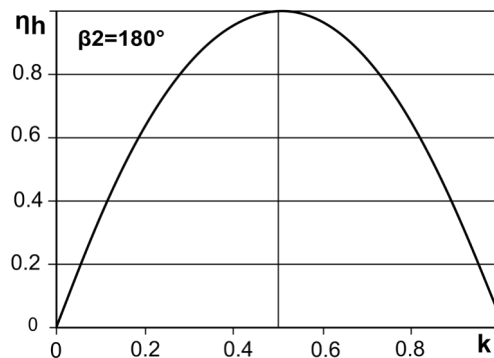


Figura 1.7 Curva característica de eficiencia hidráulica del sistema con un ángulo de salida  $\beta_2 = 180$ .  
(Fuente:[19] )

$$\eta_{h,max} = 0.5(1 - \cos \beta_2) \quad (32)$$

El análisis expuesto es despreciando la pérdida por fricción viscosa en el fluido, cuando estas pérdidas no se pueden despreciar es necesario modificar las expresiones.

#### 1.4.4. Especificaciones geométricas de las turbinas Pelton

De acuerdo con la Figura 1.8, la turbina Pelton está configurada con los principales parámetros:

- Diámetro del círculo de chorro (también llamado círculo de paso)  $Dm = 2Rm$
- Diámetro interior de la cuchara  $Db = 2Rb$

- Diámetro del rodete  $D_a = 2R_a$
- Diámetro del círculo de la punta del divisor principal  $D_s = 2R_s$
- Diámetro circular del borde del corte de la cuchara  $D_c = 2R_c$
- Número de cucharas  $N$
- Ancho interior de la cuchara  $B$
- Ángulo de salida de la cuchara  $\beta_2$
- Radio del círculo base del divisor principal  $r_s$

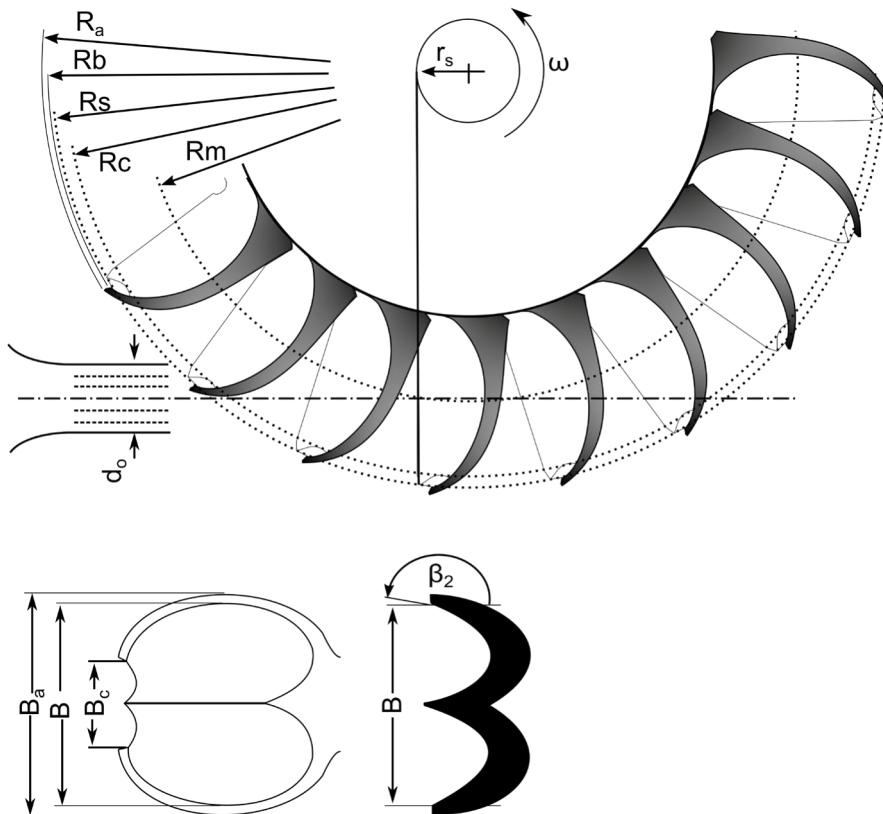


Figura 1.8 Especificaciones de los parámetros geométricos de la turbina Pelton.  
(Fuente:[19] )

El diseño básico del rodete de la turbina Pelton se basa en la especificación de fluido de trabajo en el sistema. El dimensionamiento de la cuchara depende de varios de los parámetros expuestos anteriormente y del escenario de trabajo. El diseño de las cucharas de la turbina Pelton sale del alcance de este trabajo sin embargo, se puede encontrar a detalle sobre el tema en varios trabajos previos que están tratados en [13], [15], [16], [19], en los cuales se mencionan características importantes en el dimensionamiento como: el ángulo de salida del cangilón  $\beta_2$  está determinado bajo ciertas circunstancias por las condiciones de flujo de salida requeridas, mientras que el número óptimo de cangilones se derivará de las condiciones de coincidencia y simetría, entre otras relevantes para un óptimo desempeño de la turbomaquinaria.

### 1.4.5. Principales fenómenos que producen daño en los cangilones de una turbina Pelton

Los afluentes hídricos pertenecientes a la cordillera de los Andes presentan una alta concentración de sedimentos, la cual provoca una abrasión en las cucharas giratorias y otros elementos importantes de la turbina Pelton que a menudo se llama desgaste hidro-abrasivo o erosión hidro-abrasiva [7], [23]. Este problema se presenta cuando el agua de los ríos durante o después de inundaciones se conducen hacia las turbinas Pelton sin pasar por un lago que haga una pseudo función de sedimentador. La Figura 1.9 muestra las diferentes zonas donde se presenta pérdidas de material debido a la erosión hidro-abrasiva. Además, se observa que existen algunos patrones de erosión como son:

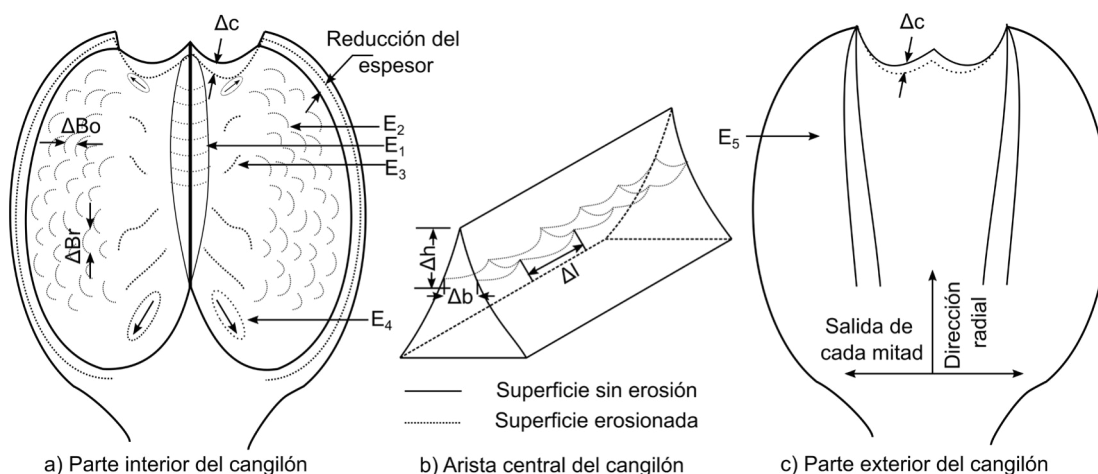


Figura 1.9 Efectos de la hidro-abrasión en los cangilones de la turbina Pelton. (Fuente: [23])

- E1: Patrón de erosión ondulado con dirección hacia adentro.
- E2: Patrón de erosión ondulado con dirección que coincide con la dirección del flujo.
- E3: Patrón de línea de erosión abultada.
- E4: Patrón con dirección de erosión por pitting.

Por otro lado, en la parte b de la Figura 1.9 se puede observar a detalle la arista central del cangilón con y sin erosión. El desgaste de los divisores principales conduce a caídas significativas en la eficiencia de las turbinas Pelton. Un aumento del ancho de la arista principal en un 1 % del ancho interior de la cuchara provoca una caída de la eficiencia de aproximadamente un 1% a plena carga [7], [23] [19].

En la Figura 1.9 se muestra los daños provocados por erosión en las cucharas del rodete de la central hidroeléctrica "ILLUCHI 2" de ELEPCO S.A.



Figura 1.10 Desgaste hidro-abrasivo en el rodete Pelton.  
(Fuente: ELEPCO S.A [7])

En base a estudios realizados en los ríos Aguarico y Napo se encontró que existen sólidos dispersos en el fluido, que en su mayoría son cuarzos con un tamaño de entre 4 y 63  $\mu m$  [7].

## 1.5. Dinámica de fluidos computacional

CFD hace referencia a la rama de la mecánica de fluidos computacional que consiste en el empleo de recursos computacionales y métodos numéricos para la resolución de todos aquellos problemas multi-físicos que están relacionados con el movimiento de fluidos, y que, en ocasiones, están asociados de otros fenómenos como la transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc. [24]. Esta sección menciona la teoría general del CFD y algunos conceptos importantes dentro de la simulación numérica.

### 1.5.1. Ecuaciones de Gobierno

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos representan enunciados matemáticos de las leyes de conservación de la física [25], [26]:

1. Conservación de masa - Ecuación de continuidad: La masa de un fluido se conserva.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (33)$$

2. Conservación del momento – Ecuación de Navier-Stokes: La tasa de cambio del momento es igual a la suma de las fuerzas sobre una partícula fluida (segunda ley de Newton).

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}'_{ij} - \nabla p \quad (34)$$

3. Conservación de energía – Primera ley de la Termodinámica: La tasa de cambio de energía es igual a la suma de la tasa de adición de calor y la tasa de trabajo realizado sobre una partícula fluida.

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla(k\nabla T) + \Phi \quad (35)$$

donde  $\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V}$  (Derivada material), el último término  $\Phi$  en la ecuación (35) es la función de disipación y  $\boldsymbol{\tau}'_{ij}$  el tensor de esfuerzo viscoso es:

$$\tau'_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \cdot \text{div} \mathbf{V} \quad (36)$$

La ecuación de Navier Stokes puede ser simplificada si nosotros asumimos flujo incompresible y de viscosidad constante [24]–[27]:

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (37)$$

La mismo aplicamos a la ecuación de la continuidad, la cual sería:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \text{div}(\mathbf{V}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (38)$$

Las ecuaciones de conservación definidas según la física a resolver vienen dadas en derivadas parciales y deben ser discretizadas y linealizadas para obtener un sistema algebraico de ecuaciones que finalmente serán resueltas numéricamente para obtener una solución final del campo fluidodinámico [24].

### 1.5.2. Discretización del volumen de control - Mallado.

Una vez definido el dominio fluido a través de la geometría a estudiar, es necesario dividir el dominio mediante aproximaciones discretas que serán llamadas celdas o elementos. Sobre estos elementos también llamados volúmenes de control serán resultas las leyes de conservación que gobiernan el fenómeno físico a estudiar.

El conjunto de elementos que conforman el dominio fluido es llamado malla y sobre esta se evalúan varios parámetros que determinan su calidad o validez para obtener un correcto resultado. Las características de la malla van ligadas al fenómeno a estudiar y de los modelos matemáticos que serán resueltos en esta, por otra parte, es conocido que entre una mejor resolución de la malla se captara de mejor manera la física del problema sin embargo esta resolución o cantidad de elementos va a ir siempre limitada con el recurso computacional y tiempo disponible del usuario. Para determinar un punto óptimo entre la cantidad de elementos y la obtención de un resultado que garantice la captura de un fenómeno es necesario desarrollar un estudio de independencia de malla, el cual consiste en evaluar varias mallas con distintas densidades y mediante las variables de campo definir en que densidad de malla los resultados empiezan a tener una independencia en sus resultados, es decir, ya no muestran cambios considerables en sus valores en distintos puntos [28].

Existen varios tipos de mallas, estructura, no estructurada e hibrida que viene a ser una combinación de las dos anteriores. Las mallas estructuradas, identificadas por la conectividad regular y la numeración consecutiva de los elementos, son las más eficientes en cuanto al tiempo de cálculo y, por lo tanto, suelen ser preferibles [17]. Para geometrías complejas como el caso de las cucharas Pelton, el trabajo de desarrollar una malla estructurada es muy difícil, por lo tanto, es necesario optar por una malla hibrida que adopta los conceptos de ambas mallas aprovechando sus ventajas.

La calidad de malla se determina mediante la herramienta *checkMesh* del paquete computacional OpenFOAM. Esta herramienta evalúa varios parámetros como:

- Volúmenes de celdas: Deben evitarse las celdas muy pequeñas o grandes entre ellas. El volumen mínimo permitido es  $1e-13$ , y volúmenes negativos grande no son permitidos.
- No-ortogonalidad de la malla: El ángulo entre la línea que conecta los centros de dos celdas y la normal de su cara común. 0 es ideal. Pero el valor máximo permitido es 65.
- Asimetría/Sesgo: La distancia entre la intersección de la línea que conecta los centros de dos celdas con su cara común y el centro de esa cara. Más pequeño es mejor. El valor permitido es típicamente 4.
- Concavidad: La máxima concavidad permitida es 80.
- Relación de aspecto: Relación entre los bordes más largos y cortos. 1.0 es ideal.

Además, la tasa de crecimiento entre las celdas que conforman la malla no debe exceder el 1.25 [17]. Los parámetros antes mencionados y otros que son expuestos en el manual de Guía de OpenFOAM [29] son esenciales para determinar si una malla tiene una calidad válida para los consiguientes análisis numéricos.

### 1.5.3. Criterio de Courant Friedrich Levy

Para el control de simulaciones inestables se hace uso del conocido número de Courant, o el criterio de Courant Friedrich Levy-(CFL)  $C_o$  que se define como la relación entre la velocidad de los fenómenos simulados y la velocidad de cálculo en la malla [30], como muestra la ecuación (39).

$$\text{Numero de Courant} = C_o = u \frac{\delta t}{\delta x} < C_{o,max} \quad (39)$$

Básicamente,  $C_o$  debe ser menor que 1 o un valor definido  $C_{o,max}$  cómo se indica en la ecuación (39). El criterio CFL significa que, si  $C_o$  es menor o igual a 1, el fluido no viaja más de una celda por cada paso de tiempo. Sin embargo, debido a la complejidad de la física de algunos fenómenos los cambios en su velocidad pueden suceder de manera muy rápida por lo cual la información calculada en una celda será superada provocando lo que en OpenFOAM se conoce como el error de punto flotante. Para evitar las mencionadas inestabilidades numéricas es posible ajustar dinámicamente el  $\Delta t$  para que este mantenga una simulación estable y reduzca el costo computacional [30].

Para análisis explícitos dependientes del tiempo, este criterio es necesario para la estabilidad. Mientras tanto, para solucionadores implícitos esto no es un requisito para la estabilidad, y el número de Courant puede ser mayor que 1 [3].

### 1.5.4. Discretización de ecuaciones diferenciales.

El paquete computacional OpenFOAM provee de una gran variedad de esquemas numéricos de discretización e interpolación de puntos. Comúnmente para la discretización espacial se utiliza un esquema numérico centrado con una precisión segundo orden que se ilustra como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^{i+1} - u^{i-1}}{2\delta x} + O(\delta x^2) \quad (40)$$

Por otro lado, para la discretización temporal se utiliza principalmente el esquema numérico de Euler que presenta una precisión de primer orden en el tiempo y una convergencia de segundo orden en el espacio como indica la expresión:



$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\delta t} + O(\delta t) \quad (41)$$

Según la física a resolver y los fenómenos que se requiera capturar la discretización espacial y temporal de los términos convectivos, difusivos, gradientes, interpolaciones y laplacianos son calibrados o seleccionados acorde a una amplia gama de esquemas numéricos que presenta las librerías de OpenFOAM, todas ellas se muestran a detalle en la guía de usuario [29]. Es necesario conocer que entre mayor sea la precisión u orden del esquema numérico, el recurso computacional y tiempo necesario aumenta considerablemente.

### **1.5.5. Proceso de solución de ecuaciones algebraicas y algoritmo de acoplamiento.**

Una vez discretizadas las ecuaciones de gobierno mediante los diferentes esquemas numéricos se obtiene un conjunto de ecuaciones algebraicas, las cuales deben ser resueltas mediante procesos iterativos hasta llegar a una convergencia de resultados. El proceso iterativo mencionado produce un residuo que es la medida del error en la solución. Entre más pequeño sea el valor del residual se obtiene una solución más precisa. OpenFOAM presenta una amplia librería de solucionadores para las distintas matrices que se generan tomando en cuenta si son matrices simétricas o asimétricas, el solucionador GAMG es recomendado para la ecuación de presión para cualquier análisis incompresible [17]. El término de gradiente de presión contribuye en la solución de la ecuación de momento de Navier-Stokes, lo que implica utilizar un método especial para el acoplamiento de presión-velocidad. El algoritmo PISO acrónimo que responde a (Presión implícita con división de operadores) es un procedimiento para el cálculo de los campos de presión y velocidad que comprende un paso predictivo y dos pasos correctores, por lo que resulta ser una extensión mejorada del algoritmo SIMPLE con un paso corrector adicional [24]. PISO es una opción comúnmente utilizada para análisis transitorios.

El algoritmo de acoplamiento de presión-velocidad es un aspecto importante para los solucionadores segregados o desacoplados. OpenFOAM utiliza el principio de solucionadores segregados, por otra parte, otros softwares hacen uso de solucionadores acoplados que requieren mayores recursos para cada paso de tiempo, pero al mismo tiempo convergen en menos pasos de tiempo.

### 1.5.6. Modelo de turbulencia

A partir de cierto número de Reynolds el flujo presenta características inestables conocidas como vórtices, lo que causa el no cierre en el sistema de ecuaciones de gobierno y que son consecuencia del término no lineal convectivo  $(\mathbf{V} \cdot \Delta)\mathbf{V}$ , el cual no se puede discretizar y resolver mediante ecuaciones algebraicas lineales. Por lo tanto, existe la necesidad de modelar o representar mediante un modelo matemático los efectos de la turbulencia y obtener ecuaciones algebraicas lineales que puedan ser resueltas en conjunto con los demás términos de las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos [28].

Para abordar el problema de la turbulencia numéricamente se han desarrollado varias técnicas que van desde la simulación numérica directa (DNS) que analiza todas las escalas de turbulencia con mallas muy finas, la simulación de grandes remolinos (LES) más simple con mallas menos densas y finalmente el promedio de Reynolds Navier-Stokes (RANS) donde las escalas se modelizan con el uso de modelos de turbulencia y son los más utilizados para aplicaciones prácticas e industriales debido a que no requieren de grandes recursos computacionales para estudiar fenómenos complejos [17], [28].

Los modelos RANS producen incógnitas adicionales que requieren ser resueltas, por lo tanto, se han desarrollado modelos de turbulencia para predecir las tensiones de Reynolds y cerrar el sistema de ecuaciones de flujo. Estos modelos se clasifican por el número de ecuaciones de transporte extra que necesitan ser resueltas como se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Modelos de turbulencia.

Numero de Ecuaciones	Modelo de turbulencia
Cero	<i>Mixing length</i>
Una	<i>Spalart-Allmaras</i>
Dos	$k - \epsilon$
	$k - \omega$
	$k - \omega SST$
	<i>Algebraic stress</i>
Siete	<i>Reynolds stress</i>

(Fuente: [17])

La selección de un modelo de turbulencia adecuado ha sido el objetivo de varios estudios con fin industrial, los modelos de 2 ecuaciones  $k - \epsilon$ ,  $k - \omega$  y  $k - \omega SST$  han sido los más indicados para estudiar varios fenómenos físicos y han presentado una buena aproximación en los resultados con un coste computacional razonable. Basado en estudio previos el modelo  $k - \epsilon$  ha sido el más utilizado para estudios de flujo libre

aplicados a turbinas Pelton [17], sin embargo Menter (1994) con el fin de hacer una formulación más robusta en la zona de transición entre la capa límite (donde  $k - \omega$  presenta buenas prestaciones) y la zona de flujo libre (zona sin turbulencia, bien calculado ya por  $k - \varepsilon$ ) introduce el denominado modelo  $k - \omega SST$  que será utilizado para este estudio. El modelo mencionado resuelve dos ecuaciones la primera perteneciente a la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la segunda a la tasa de disipación turbulenta específica ( $\omega$ ), las cuales pueden ser calculadas mediante:

$$k = \frac{3}{2} (I |U_{ref}|)^2 \quad (42)$$

Donde,  $I$  es la intensidad turbulenta expresada en [%] y  $U_{ref}$  es la velocidad media del flujo expresada en [m/s], por otro lado, la tasa de disipación viscosa puede ser expresada:

$$\omega = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (43)$$

Donde,  $C_{\mu}$  es una constante del modelo equivalente a 0.09 y  $L$  es la longitud de escala turbulenta igual a  $L = 0.07 D_h$ .

## 1.6. Software libre y de código abierto OpenFOAM

La simulación numérica en la actualidad es una importante herramienta para predecir varios fenómenos multifásicos que son útiles para el diseño de turbomaquinaria. La simulación numérica habitualmente se puede desarrollar mediante software comercial el cual presenta una gran desventaja debido al costo del licenciamiento. Por otro lado, tenemos el software libre que nos brinda el acceso a una fuente abierta, a una constante retroalimentación de la comunidad científica, no tiene costo de licenciamiento y nos permite mejorar los códigos existentes sin ninguna limitación.

En 1985, Richard Stallman definió el concepto de Software Libre en cuatro libertades [30], las cuatro libertades indicaron que no existe ninguna limitante en creación, modificación o reproducción en el software libre, y pueden ser clave importante para el desarrollo de futuros proyectos de investigación, tal es el caso de la librería c++ [toolbox](#) para CFD llamada OpenFOAM.

### 1.6.1. OpenFOAM

OpenFOAM es acrónimo de *Open-source Field Operation and Manipulation*, esta librería ha sido desarrollada para la resolución de problemas de mecánica de fluidos y su

asociación con otros fenómenos como transferencia de calor, reacciones químicas, interacción con partículas, etc. basado en el método de volúmenes finitos (FVM).

En un inicio la librería fue desarrollada para el sistema operativo Linux, pero actualmente existe el paquete computacional compatible con Windows directamente y mediante el subsistema de Linux-Ubuntu en Windows. El presente trabajo utiliza la versión 9 de OpenFOAM.

### 1.6.2. Utilidades de OpenFOAM

OpenFOAM está constituido por funciones y herramientas independientes para las diferentes etapas que se presentan en la simulación numérica CFD, estas etapas son:

**Preproceso:** Etapa donde se define la geometría, mallado, modelo de turbulencia y condiciones de borde e iniciales.

**Proceso:** Solución de las ecuaciones de transporte mediante esquemas y solucionadores numéricos.

**Postproceso:** Etapa donde se puede exportar y visualizar los resultados de los campos obtenidos de presión, velocidad, temperatura, etc. Por otra parte, en esta etapa es posible calcular coeficientes, fuerzas, residuales, yPlus, etc. Algunas de estas herramientas han sido utilizadas en este estudio y se muestran enlistadas a continuación:

Tabla 1.4 Herramientas utilizadas de OpenFOAM.

	NOMBRE	FUNCIÓN
Pre-proceso	<b>blockMesh</b>	Permite desarrollar mallas estructuradas y mallas bases que son útiles para ser procesadas en la herramienta snappyHexMesh.
	<b>snnapyHexMesh</b>	Permite desarrollar mallas híbridas
	<b>createPatch</b>	Crea un nuevo límite en la malla y elimina otras que tienen 0 caras
	<b>createBaffles</b>	Convierte las caras internas en caras límite. No duplica puntos.
	<b>surfaceFeatures</b>	Extrae las características geométricas de las superficies utilizadas para desarrollar la malla.
	<b>mergeMeshes</b>	Une mallas de un dominio secundario a un dominio master y los trata como una sola.
Proceso	<b>topoSet</b>	Crea un set o conjunto de celdas dentro del dominio o pertenecientes a todo el dominio, sobre las cuales se va a asignar ciertos valores o condiciones de borde, como por ejemplo un dominio rotatorio.
	<b>decomposePar</b>	Permite descomponer el dominio computacional acorde a las capacidades de nuestro recurso computacional aplicando métodos de descomposición para optimizar los procesos de cálculo.
	<b>renumberMesh</b>	Reacomoda las matrices algebraicas discretizadas de manera que puedan ser resultados de una manera más óptima.
	<b>interFoam</b>	Solver para resolver 2 fluidos inmiscibles isotérmicos e incompresibles utilizando VOF.

<b>Post-proceso</b>	<b>reconstructParMesh</b>	Permite reconstruir la malla despues de ser desarrollada por snnapyHexMesh
	<b>reconstructPar</b>	Permite reconstruir los time steps calculados por el solver interFoam a partir de los procesos.
	<b>Yplus</b>	Permite calcular el parametro adimensional Yplus en todo el dominio.
	<b>forceCoeffs</b>	Permite calcular las fuerzas y momentos ejercidos sobre las paredes en estudio.

(Fuente: [29])

### 1.6.3. Movimiento del dominio rotacional.

En la actualidad existen varios problemas sobre turbomaquinaria que pueden ser resueltos mediante CFD e involucran movimientos rotacionales de ciertas zonas del dominio fluido. Uno de los ejemplos claros son los estudios numéricos de las turbinas Pelton, Francis, Kaplan donde sus rodets requieren un movimiento giratorio sobre un eje central como se observa en la Figura 1.11.

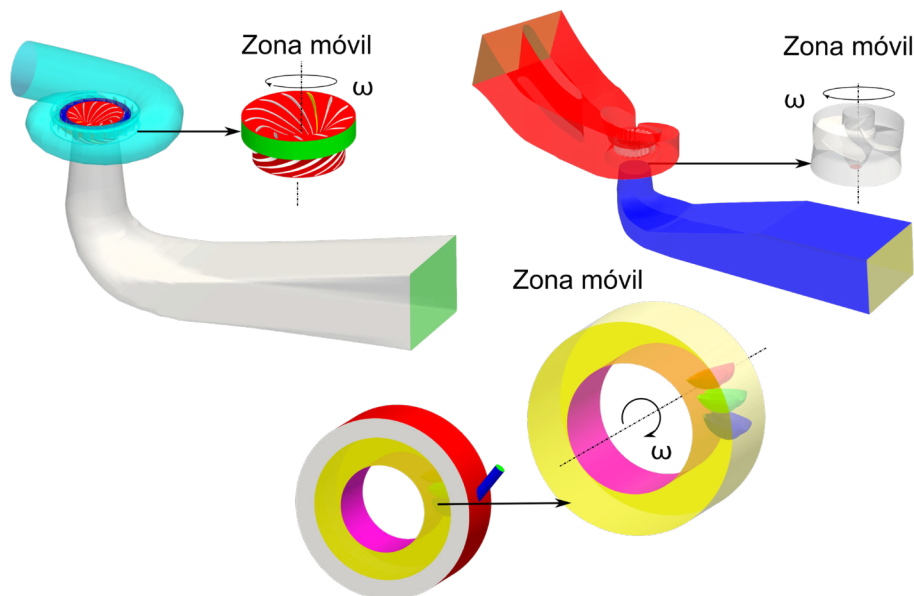


Figura 1.11 Zona móvil en dominios computacionales de turbinas hidráulicas.  
(Fuente: Propia)

Para calcular la interacción del fluido con los cangilones pertenecientes a diferente dominio es estacionario y rotatorio, se requiere escoger un método que resuelva el intercambio de información de la interfaz deslizante entre las mencionadas zonas de la malla. Los métodos de acoplamiento de interfaz disponibles en OpenFOAM-v9 son AMI y ACMI que son expuestos en este apartado.

#### 1.6.3.1. Interfaz de malla arbitraria (AMI)

AMI es una técnica de malla deslizante en la que la zona móvil gira alrededor de un eje y los valores que se encuentran en la interfaz se interpolan y proyectan hacia el dominio estacionario para actualizar la malla en cada paso de tiempo [31], además es posible

conectar mallas adyacentes desconectadas con una interfaz para cada dominio en estado estacionario. Sin embargo, también es posible proyectar ambos parches a una superficie intermedia, como una geometría de superficie triangulada o una superficie continua (definida por alguna función). AMI se basa en el algoritmo descrito en Farrel [32] y Jasak [33]. La implementación está completamente paralelizada y es funcional en una distribución de varios subdominios o confinada a un solo subdominio. La acción topológica consiste en eliminar las caras de la interfaz original y las reemplaza con nuevas caras para lograr una conectividad uno a uno creando en el proceso nuevos puntos resultado de la proyección de los puntos del dominio móvil en cada paso de tiempo o iteración. El funcionamiento del algoritmo se muestra esquemáticamente en la Figura 1.12.

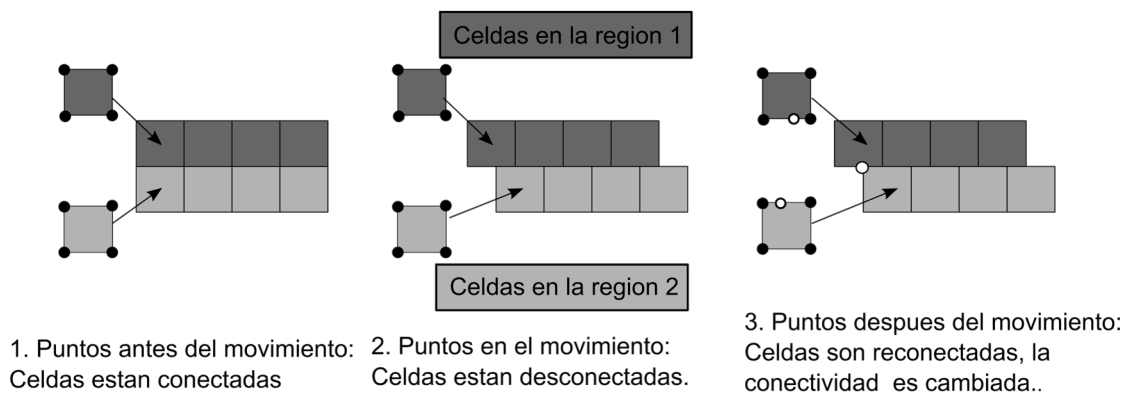


Figura 1.12 Operación de la interfaz deslizante.  
(Fuente: Propia)

### 1.6.3.2. Interfaz de malla acoplada arbitrariamente (ACMI)

El método AMI es aplicable cuando las interfaces coinciden todo el tiempo para las dos regiones, es decir, al momento de proyectar los puntos de una sobre otra cada uno tiene un punto de llegada en la otra interfaz. Existen muchos casos que se desee acoplar las interfaces o límites parcialmente entre sí para lo cual AMI no es aplicable. En la actualidad, se ha desarrollado la condición de borde *cyclicACMI* que permite realizar un acoplamiento de interfaces parciales combinando la condición *cyclicAMI* con otro tipo de límite, por ejemplo, el restante de la interfaz que no cumple el criterio AMI puede configurarse como pared u otro tipo de límite. La condición de *cyclicACMI* funciona en paralelo y no requiere un tratamiento de descomposición especial.

## 2. METODOLOGÍA

Con el fin de estudiar el comportamiento del flujo dentro de una turbina Pelton, se ha tomado un dominio geométrico con características similares a la turbina perteneciente a la central hidroeléctrica “Illuchi N°2” de la empresa ELEPCO S.A, sobre este dominio se realizan algunas simulaciones transitorias basadas en los datos reales del funcionamiento de la central utilizando tanto el enfoque AMI como el ACMI para comparar su funcionamiento y aplicación en este tipo de turbomaquinaria, finalmente validaremos los resultados del torque máximo obtenido en ambos enfoques con el dato real de la central en un escenario estable de funcionamiento. La Figura 2.1 muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para el estudio CFD.

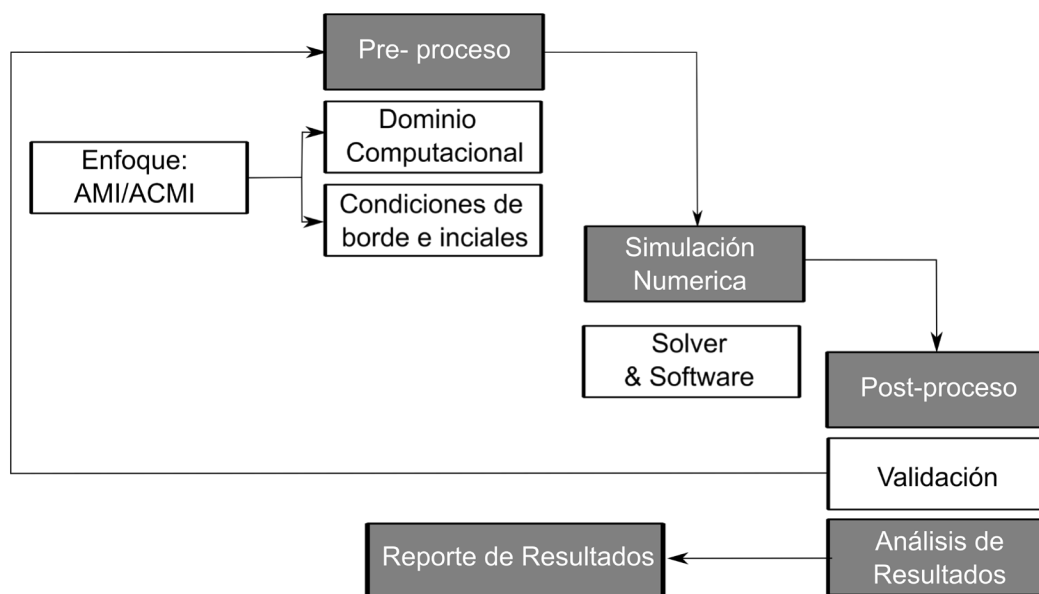


Figura 2.1 Metodología CFD.  
(Fuente: Propia)

### 2.1. Estructura del Caso OpenFOAM

La Figura 2.2 muestra a detalle la estructura de un caso con una breve descripción de lo que contiene y significa cada directorio o fichero. Inicialmente antes de ejecutar la simulación se configuran las carpetas *0*, *constant*, *system* y adicionalmente algunos ejecutables para automatizar el proceso. Después de ejecutar las distintas fases de la simulación se genera nuevos directorios y ficheros que perteneces a los tiempos guardados de simulación, funciones de post-procesamiento y adicionalmente se guardan unos archivos con formato *log.(nombre de la aplicación)* donde se guarda toda la información generada por las herramientas de OpenFOAM. Los archivos *log* permiten

visualizar el estado de la simulación y extraer de los mismos los residuales, continuidad, nCourant, etc. Lo antes mencionado será tratado en los siguientes apartados a detalle.

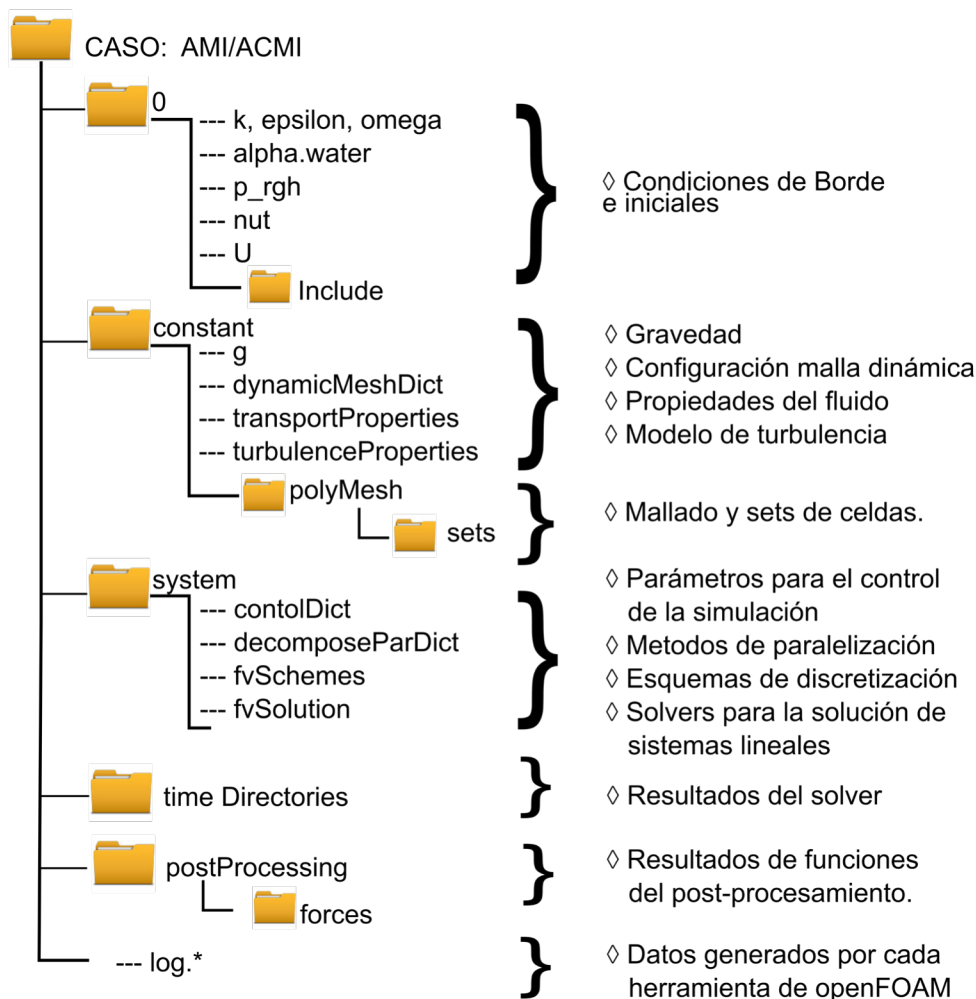


Figura 2.2 Estructura y descripción del directorio del caso AMI & ACMI en OpenFOAM. (Fuente: Propia)

## 2.2. Modelo geométrico 3D de la turbina Pelton

El modelo de los cangilones fue tomado de un trabajo previo desarrollado por Barragán & Parra [7], el posicionamiento del inyector y cangilones se realizó en base a los planos emitidos por la central hidroeléctrica “Illuchi N°2”. Inicialmente, se modeló el dominio estacionario conocido como carcasa, considerando que el inyector de agua está colocado a 50° del eje y, en el sentido horario. Luego, se generó el dominio rotatorio perteneciente al rodete Pelton. Estudios previos han demostrado que basta con utilizar tres cangilones del rodete para caracterizar el comportamiento del fluido sobre ellos [17]. Los cangilones se colocaron usando una referencia tangencial a una circunferencia de 1000 [mm] de diámetro medido desde el centro del dominio computacional. Como se muestra en la Figura 2.3 y Figura 2.4, los dominio estacionarios y rotatorios son



ensamblados para obtener el dominio computacional final en cada una de las técnicas utilizadas. Es necesario generar una superficie entre ambos, ya que es el elemento principal que permite la transferencia de datos desde el dominio maestro (rotatorio) al esclavo (estacionario). Además, los dominios se modelaron a la mitad para estudiarlos con un plano de simetría con el fin de reducir el costo computacional en la simulación.

### 2.2.1. Modelo geométrico AMI

El dominio computacional desarrollado para el método AMI comprende principalmente una superficie o interfaz de la misma característica geométrica para cada subdominio sobre las cuales se aplicará el método expuesto en la sección 1.6.3.1. La Figura 2.3 muestra el dominio desarrollado en un software CAD, a partir del cual se exportaron en diferentes superficies las partes necesarias para generar la malla. Principalmente se logra identificar el dominio rotatorio que contiene los 3 cangilones (A1, A2, A3) y las superficies restantes que pertenecen a la simetría y a las atmósferas. Por otro lado, el dominio estacionario contiene de igual manera las atmósferas, la superficie de simetría y finalmente tiene una parte que se cataloga como pared perteneciente al inyector.

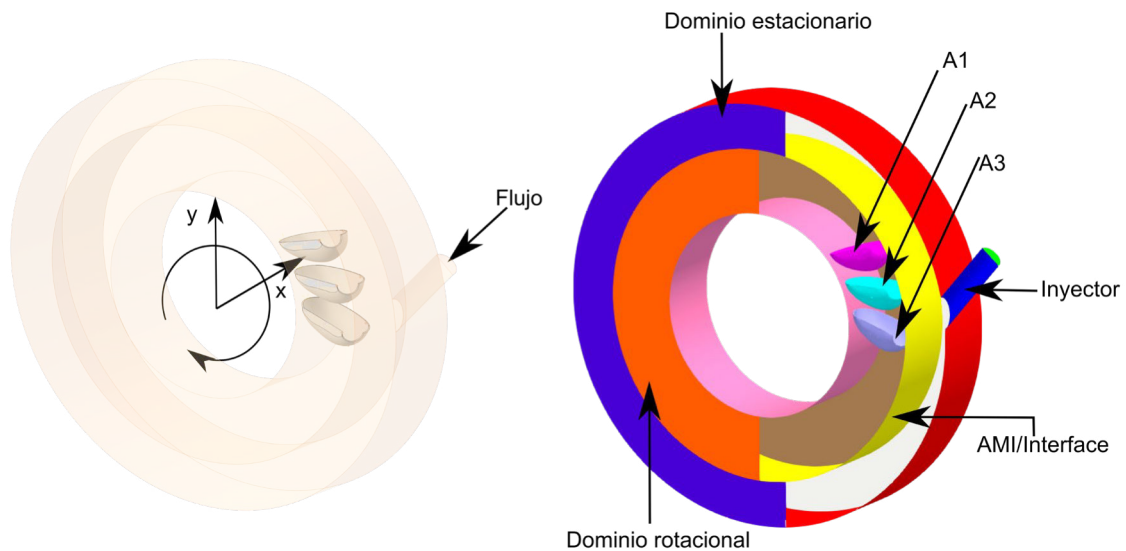


Figura 2.3 Dominio geométrico utilizado en el enfoque AMI.  
(Fuente: Propia)

### 2.2.2. Modelo geométrico ACMI

El dominio computacional desarrollado para el método ACMI consta de dos partes en la interfaz de transferencia de datos, una superficie común entre los dominios estacionario y giratorio que funcionará con la técnica AMI y otra interfaz restante del dominio estacionario que albergará una condición de borde diferente que en este caso será configurada como atmósfera. La Figura 2.4 muestra a su izquierda el dominio geométrico desarrollado en un modelo CAD y a su derecha la descomposición de este

en superficies para su posterior mallado. De igual manera que el dominio AMI contiene un dominio estacionario y rotatorio que abarca varias partes o límites. Como es evidente el modelo geométrico es reducido a la mitad para el dominio estacionario y a un cuarto para el dominio rotatorio, la variación geométrica mencionada es posible gracias a método ACMI y su prestación de generar unas condiciones de borde a las zonas que no están en contacto para ambos dominios.

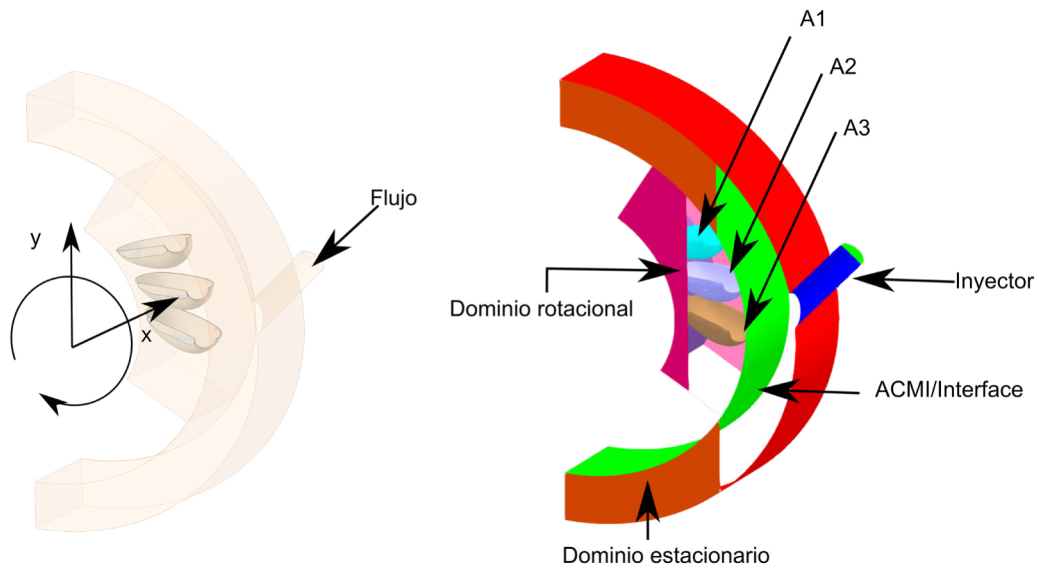


Figura 2.4 Dominio geométrico utilizado en el enfoque ACMI.  
(Fuente: Propia)

### 2.3. Desarrollo y generación de la malla

Debido a la complejidad de la geometría de los cangilones, se utilizó una malla híbrida para establecer la discretización del dominio en ambos casos como se observa en la Figura 2.5 y Figura 2.6. Para cada dominio se generó una malla base, que fue desarrollada mediante la herramienta *blockMesh*, la cual cubre el dominio geométrico totalmente con celdas uniformes de un tamaño determinado. Partiendo de la malla base es necesario desarrollar un remallado interno mediante la herramienta *snappyHexMesh*, que permite extraer únicamente las celdas que están dentro del volumen cerrado generado, refina los límites y otorga otras características según la configuración de la herramienta. Para generar las zonas de celdas móviles del rotor fue necesario utilizar la herramienta *topoSet* y finalmente para obtener la malla final para AMI únicamente se fusionan las mallas de dominio estacionario y rotatorio utilizando las herramientas *mergeMeshes*, adicionalmente para el caso de la malla ACMI se ejecuta un procedimiento especial para generar la malla final en OpenFOAM.

### 2.3.1. Mallado del dominio computacional AMI.

La Figura 2.5 muestra la malla de ambos dominios estacionario y rotatorio, posteriormente se observa la fusión de estas en un mismo dominio, además se observa la interfaz que pertenece a cada malla y la misma que transmitirá la información desde el dominio rotatorio al estacionario.

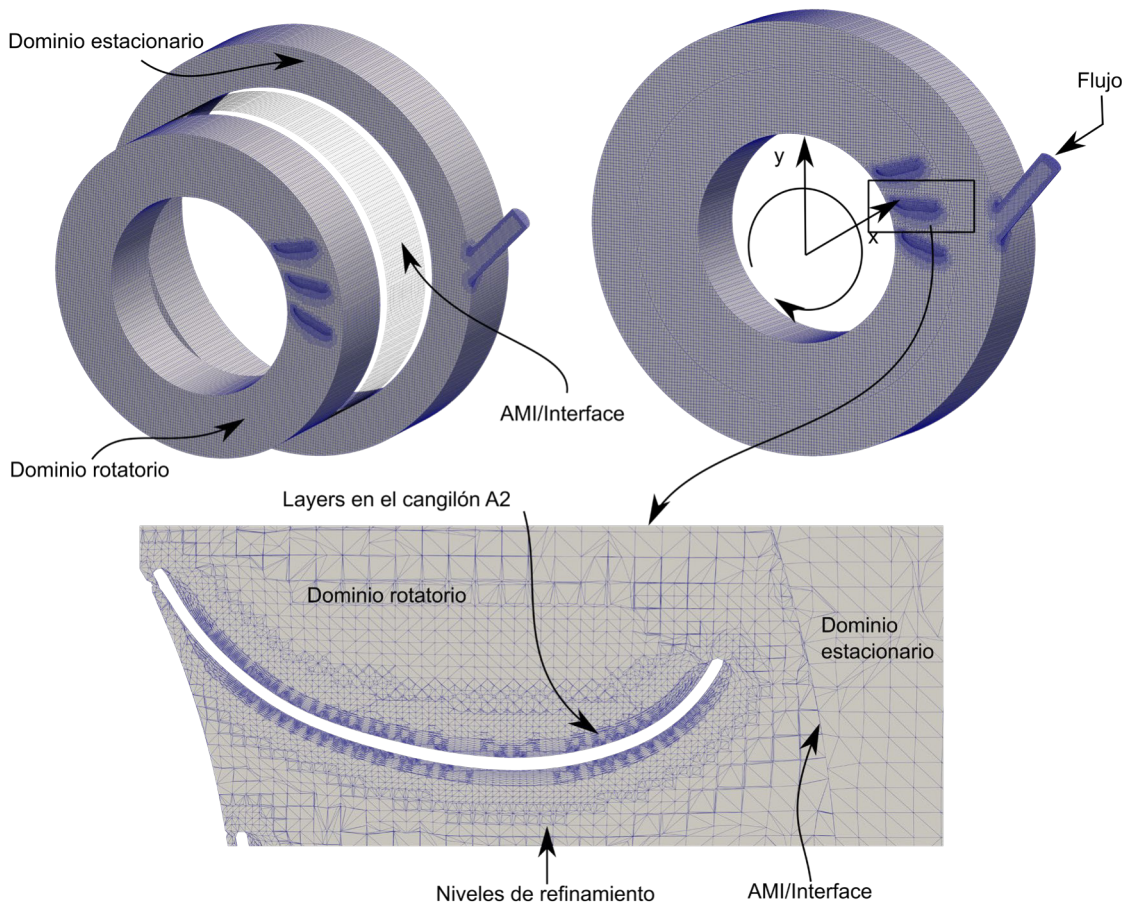


Figura 2.5 Detalle de los refinamientos y layers de la malla AMI.  
(Fuente: Propia)

En la parte inferior de la Figura 2.5 se observa a detalle las características de la malla como: los niveles de refinamiento (celdas de distintos tamaños) y *layers* aplicadas sobre las superficies de los cangilones con el fin de acoger con mayor precisión el comportamiento del fluido al momento del impacto. Como observación especial en el seteo de este tipo de mallas, la fuente de comunicación entre el dominio maestro y esclavo es la interfaz, que para efectos de resto del estudio serán llamado *AMI1* y *AMI2* pertenecientes al dominio estacionario y rotatorio respectivamente. Estas superficies deben ser lo más similares posibles con un tamaño de celda muy similar para que exista una buena comunicación. Caso contrario si las superficies son diferentes

geométricamente o las mallas tienen densidades o características muy diferentes, la simulación tiene una alta probabilidad de divergir.

### 2.3.2. Mallado del dominio computacional ACMI.

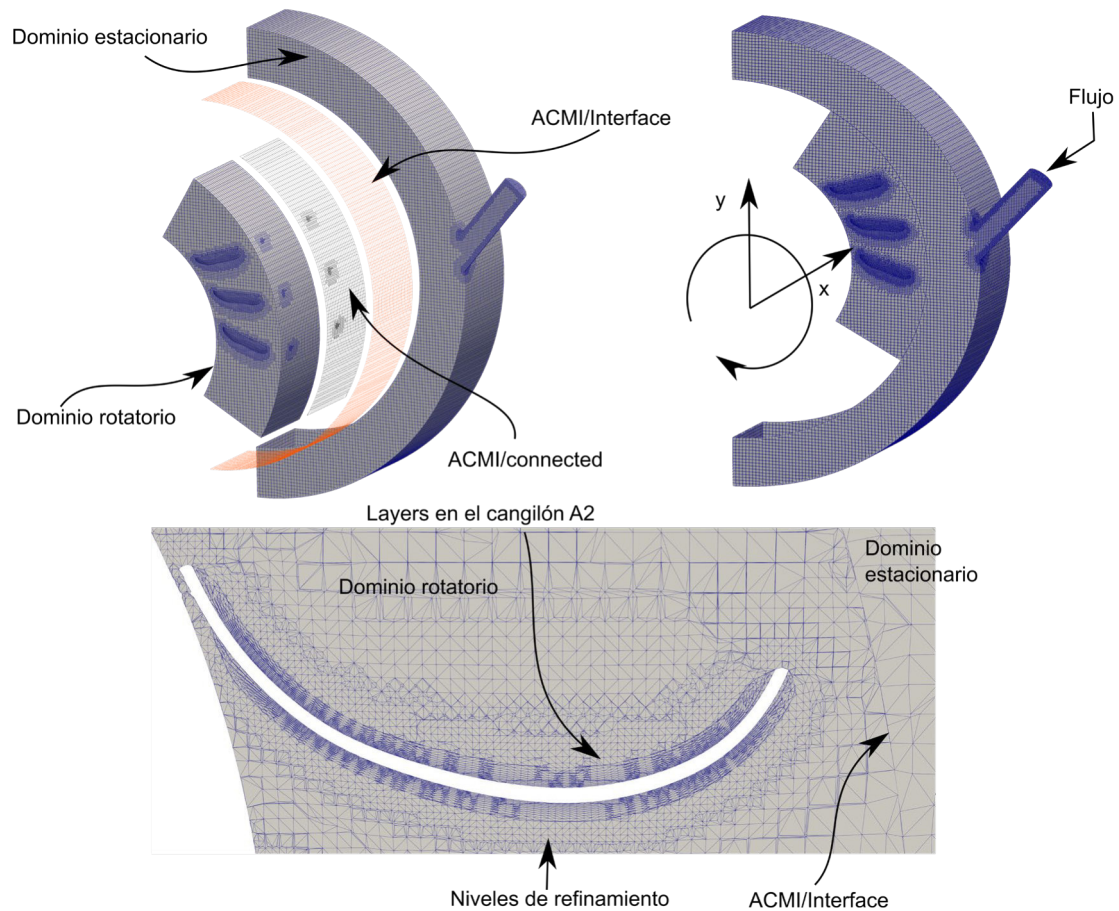


Figura 2.6 Detalle de los refinamientos y layers de la malla ACMI.  
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.6 al igual que en la sección anterior se evidencia la malla generada para el método ACMI, las características de mallas son muy similares para poder comparar los resultados finales. En particular para esta malla se desarrolla un proceso extra luego de fusionar las mallas, como se observa la interfaz para cada dominio no cumple con el criterio de que deben ser totalmente similares en características geométricas, por lo tanto, se hace uso de los comandos *createPatch*, *topoSet* y *createBaffles* para preparar una nueva configuración de malla que permite tratar como AMI a las partes de la interfaz que están en contacto y las partes restantes les otorga una condición de borde diferente como atmosfera. En el ANEXO I., ANEXO II., ANEXO III. y ANEXO IV. se detalla los códigos utilizados para el desarrollo de la malla.

### 2.3.3. Estudio de independencia y calidad de malla

El análisis de independencia de malla consiste en realizar una comparación entre las diferentes alternativas de malla (mallas con distinta cantidad de elementos, pero similares topológicamente) y evaluar una variable de interés en una zona del dominio de tal manera que, bajo las mismas condiciones de estudio se obtenga una convergencia hacia un resultado esperado para ser validado. La finalidad de este estudio es encontrar un punto óptimo entre la cantidad de elementos mínimos para capturar un fenómeno físico con buena precisión en la simulación y el uso de recursos computacionales. Es necesario indicar que entre mayor sea el número de elementos, mayor es el recurso computacional necesario. Para desarrollar el estudio de independencia de malla se tomó una configuración de snappyHexMesh fija y se varió únicamente el tamaño de elemento de la malla base como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Detalle de mallas desarrolladas en el estudio AMI y ACMI.

MALLA	AMI		ACMI	
	M. BASE [mm]	# ELEMENTOS [-]	M. BASE [mm]	# ELEMENTOS [-]
M1	11	1753228	11	1622496
M2	10	2175529	10	2000516
M3	9	2774870	9	2520844
M4	8.5	3137597	8.5	2844124

(Fuente: Propia)

Para el proceso de evaluación de calidad de malla se ejecuta la herramienta *checkMesh*, para cada una de las mallas desarrolladas mediante la cual se determinó que los valores de los parámetros de calidad de malla mencionados en la sección 1.5.2 en su mayoría están dentro de los límites permitidos.

## 2.4. Preprocesamiento del caso en OpenFOAM

Para continuar con el desarrollo del caso OpenFOAM es necesario crear y configurar las carpetas y ficheros expuestos en la Figura 2.2. El detalle de los procedimientos relaciones a cada fichero y carpeta son expuestos en esta sección, partiendo de la geometrías y mallas mostradas en las secciones previas.

### 2.4.1. Condiciones de operación Turbina Pelton

En la Tabla 1.2 se muestran las condiciones de operación de dos turbinas Pelton en la central “Illuchi N°2”, para este trabajo se ha tomado la turbina nombrada como T1. A partir de esta se calcularán las condiciones mostradas en las secciones siguientes.



### 2.4.2. Condiciones de borde e iniciales

La Figura 2.7 muestra los límites configurados con sus respectivos nombres, donde A1, A2, A3 corresponden a los cangilones y serán tomados como pared al igual que INYECTOR-WALL, además ROT-SYM y NROT-SYM corresponden al plano de simetría. AMI1 y AMI2 corresponden a las interfaces de transferencia de datos con el método *cyclicAMI* entre el dominio estacionario y rotatorio. Por otro lado, INYECTOR-INLET es la entrada del fluido y los límites restantes corresponden a las salidas del fluido configurados como atmósferas.

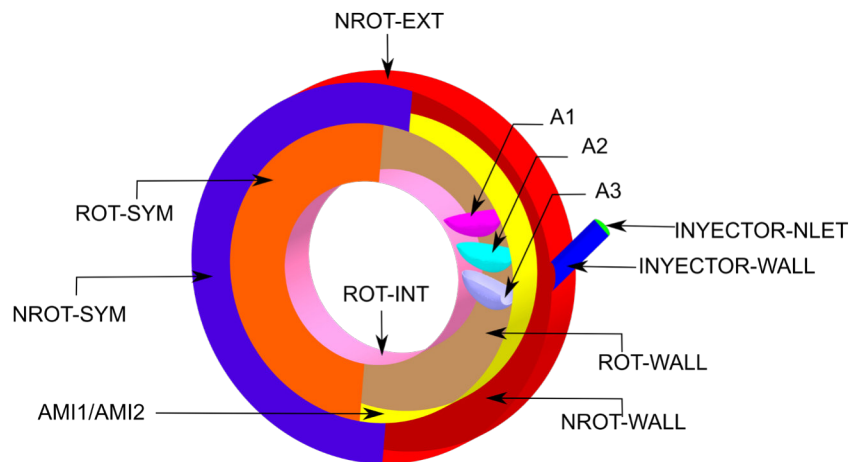


Figura 2.7 Límites seteados en el dominio AMI.  
(Fuente: Propia)

La Figura 2.8 muestra de igual manera los límites para el caso ACMI, en su mayoría tienen las mismas configuraciones que el dominio para AMI sin embargo se tienen unos límites extras ROT-P1/2 y NROT-P1/2 que son configurados como salidas y, por otro lado, tenemos los límites ACMI1/2\_couple que tienen la configuración de *cyclicACMI* y ACMI1/2\_blockage que tienen la configuración de salida o atmósfera.

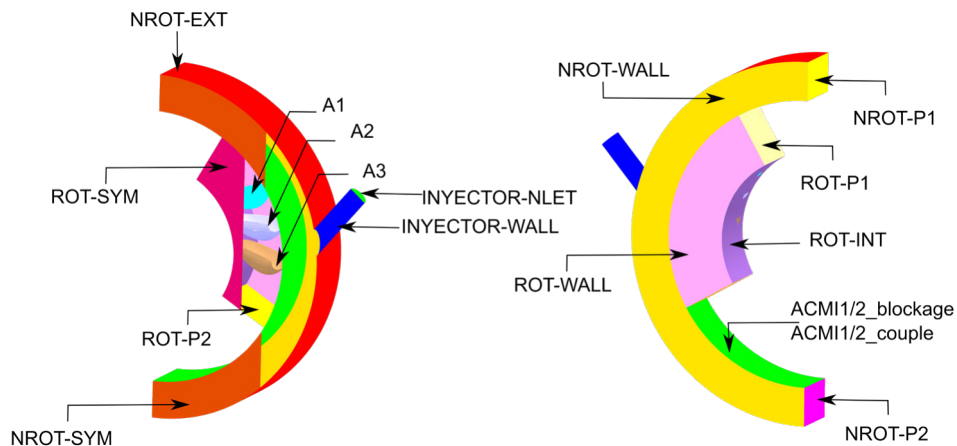


Figura 2.8 Límites seteados en el dominio ACMI.  
(Fuente: Propia)

El flujo volumétrico es obtenido a través de las condiciones de operación Tabla 1.2, considerando que se trabaja con un inyector y con un plano de simetría. Además, el fluido dentro de la carcasa está a presión atmosférica por lo cual todas las salidas están seteadas a 0 [Pa], las variables de turbulencia son calculadas en base a las ecuaciones de la sección 1.5.6. y son expuestas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Condiciones iniciales.

Condición	Valor Fijo
Entrada: Flujo volumétrico	0.2195 [ $m^3/s$ ]
Salidas: Presión total	0 [Pa]
Energía cinética turbulenta ( $k$ )	22.44 [ $m^2/s^2$ ]
Tasa de disipación turbulenta específica ( $\omega$ )	1466.729 [1/s]
Tasa de disipación turbulenta ( $\epsilon$ )	2962.767 [ $m^2/s^3$ ]
Velocidad Angular	37.669112 [rad/s]

Fuente: (Propia)

Las condiciones de borde e iniciales son configuradas en los ficheros  $U$ ,  $p\_rgh$ ,  $alphaWater$ ,  $nut$ ,  $k$  y  $omega$  dentro de la carpeta  $0.orig$ , que corresponden a la velocidad, presión, fracción volumétrica de agua, viscosidad turbulenta, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta específica respectivamente y se muestran en resumen en las Tabla 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3 Resumen de las condiciones de borde para el caso AMI y ACMI.

Parte	U	Campo	
		p_rgh	alphaWater
INJECTOR-INLET	flowRateInletVelocity	zeroGradient	FixedValue
INJECTOR-WALL	noSlip	fixedFluxPressure	zeroGradient
A1, A2, A3	movingWallVelocity	fixedFluxPressure	zeroGradient
NROT-SYM	symmetry	symmetry	symmetry
ROT-SYM			
NROT-EXT	pressureInletOutletVelocity	totalPressure	inletOutlet
NROT-WALL			
ROT-WALL			
ROT-INT	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI
AMI1			
AMI2	FixedValue	totalPressure	inletOutlet
NROT-P1			
NROT-P2	inletOutlet	totalPressure	inletOutlet
ROT-P1			
ROT-P2	cyclicACMI	cyclicACMI	cyclicACMI
ACMI1_couple			
ACMI2_couple	pressureInletOutletVelocity	totalPressure	inletOutlet
ACMI1_blockage			
ACMI2_blockage			

Fuente: (Propia)

Tabla 2.4 Resumen de las condiciones de borde para el caso AMI y ACMI.

Parte	Campo		
	nut	k	omega
INYECTOR-INLET	calculated	fixedValue	fixedValue
INYECTOR-WALL	nutkWallFunction	kqRWallFunction	omegaWallFunction
A1, A2, A3	nutkWallFunction	kqRWallFunction	omegaWallFunction
NROT-SYM	symmetry	symmetry	symmetry
ROT-SYM			
NROT-EXT	calculated	zeroGradient	zeroGradient
NROT-WALL			
ROT-WALL			
ROT-INT	cyclicAMI	cyclicAMI	cyclicAMI
AMI1			
AMI2	calculated	zeroGradient	zeroGradient
NROT-P1			
NROT-P2			
ROT-P1	calculated	zeroGradient	zeroGradient
ROT-P2			
ACMI1_couple	cyclicACMI	cyclicACMI	cyclicACMI
ACMI2_couple			
ACMI1_blockage	calculated	zeroGradient	zeroGradient
ACMI2_blockage			

Fuente: (Propia)

### 2.4.3. Propiedades del fluido de trabajo

Dentro del directorio *constant/transportProperties* se encuentran las propiedades de los fluidos de trabajo agua y aire. El modelo de transporte escogido es newtoniano para ambas fases, que significa que la viscosidad cinemática tiene un valor fijo y es nombrada bajo el parámetro *nu*. La densidad del fluido es nombrada bajo el parámetro *rho*. Además, es necesario nombrar la tensión superficial entre las dos fases bajo el parámetro *sigma*. Por otro lado, la gravedad fue ingresada en el directorio *constant/g* en la dirección y negativa. En la Tabla 2.5 y en el ANEXO I. se muestra resumen de las configuraciones antes mencionadas.

Tabla 2.5. Propiedades del fluido.

Parametro	Valor
<b>Water - Agua</b>	
nu	1e-06 [ $m^2/s$ ]
rho	998.9 [ $kg/m^3$ ]
<b>Air- Aire</b>	
nu	1.48e-05 [ $m^2/s$ ]
rho	1 [ $kg/m^3$ ]
<b>sigma</b>	0.0728 [ $kg/s^2$ ]
<b>g</b>	9.82 [ $m/s^2$ ]

Fuente: (Propia)



#### 2.4.4. Modelo de turbulencia

Dentro del directorio *constant/turbulenceProperties* (ANEXO I.) se encuentra la configuración del modelo de turbulencia. Para resolver la turbulencia se ha tomado un modelo tipo RANS (*Reynolds Averaging Navier-Stokes*) nombrado *kOmegaSST* como se menciona en la sección 251.5.6.

#### 2.4.5. Configuración del movimiento de la malla AMI y ACMI

Dentro del fichero *constant/dynamicMeshDict* (ANEXO I.) se encuentra la configuración para el movimiento del dominio rotatorio. Dentro de este se configurará, el tipo de solver de *DynamicMesh* (Malla dinámica), el *CellZone* o *CellSet* (Zona o set de celdas) que se moverá y finalmente el tipo de movimiento (rotación, traslacional o ambas). Para ambos casos de estudio el tipo de movimiento es rotación, por lo cual debemos ingresar el origen de rotación, el eje de rotación y su velocidad angular para completar la configuración. Lo antes mencionado se muestra en la Figura 2.9.

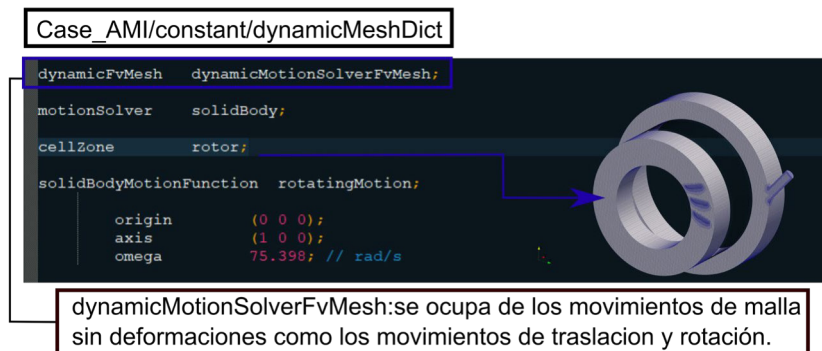


Figura 2.9 Configuración del fichero *dynamicMeshDict*.  
Fuente: (Propia)

Para que el solver de *dynamicMesh* funcione correctamente, es necesario configurar las interfaces AMI y ACMI (Figura 2.10) dentro de la malla final que pertenece al dominio rotatoria y estacionaria, la cual será la encargada del intercambio de información a través de las condiciones de borde *cyclicAMI* o *cyclicACMI* respectivamente.



Figura 2.10 Interfaces de acoplamiento AMI y ACMI.  
Fuente: (Propia)

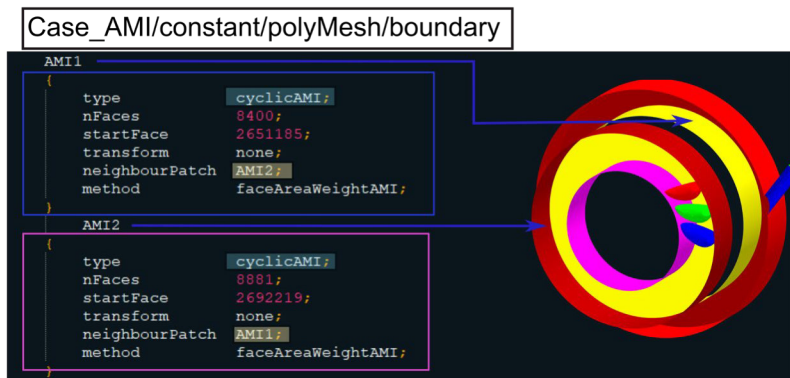


Figura 2.11 Modificación de los patches AMI1 and AMI 2.  
Fuente: (Propia)

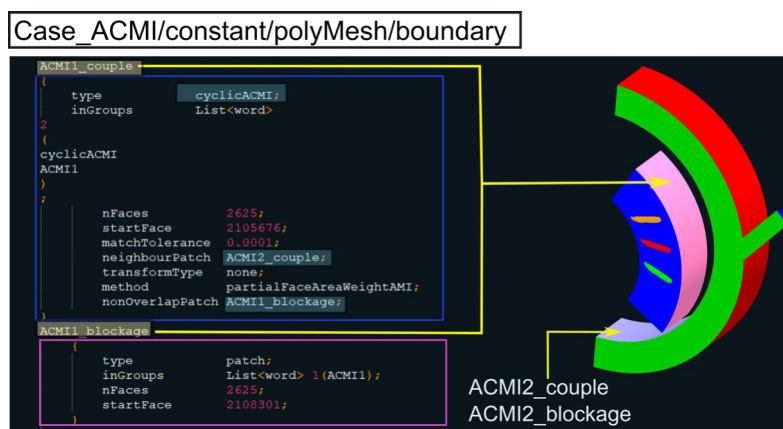


Figura 2.12 Modificación de los patches ACMI1/2\_couple and ACMI1/2\_blockage.  
Fuente: (Propia)

Finalmente, configuramos las condiciones de contorno en la malla final para los parches AMI y ACMI como se muestra en la Figura 2.11 y Figura 2.12. Para conseguir esta configuración final es necesario desarrollar los procedimientos expuestos a continuación.

#### 2.4.5.1. Generación de las zonas rotatorias con TopoSet

Para generar el *cellZone* necesario para el fichero *dynamicMesh* se configura y se ejecuta la herramienta *topoSetDict* y *setsToZone*.

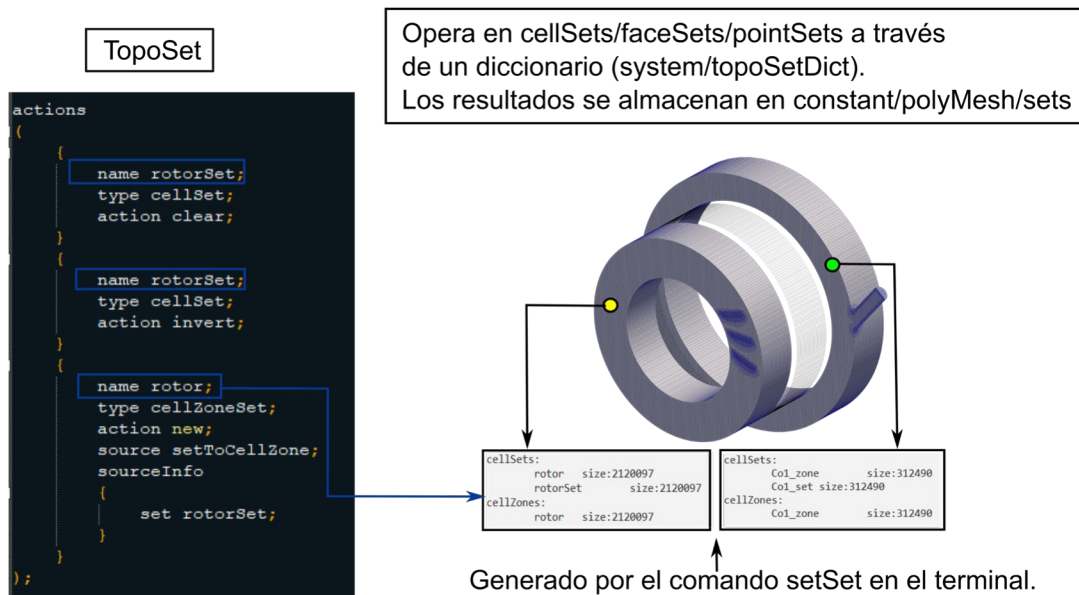


Figura 2.13 Generación de cellSets.  
Fuente: (Propia)

La Figura 2.13 muestra la configuración del fichero *topoSet*, dentro de esta se realizan varias acciones sobre toda la malla hasta obtener un conjunto de celdas sobre la cual se aplica el algoritmo de movimiento y finalmente se aplica el comando *setsToZones* para obtener una zona de celdas lista para ser leída por el fichero *dynamicMeshDict*. Para verificar la existencia de las zonas y sets generados, se ejecuta la herramienta *setSet*, un ejemplo de resultado se muestra en la misma figura antes expuesta.

#### 2.4.5.2. Unión de las mallas con MergeMeshes

Como se muestra en la Figura 2.14 las mallas de los subdominios estacionario y rotatorio se desarrollan por separado y a estas se aplica la herramienta *topoSet* para nombrarlas como un set de celdas. A continuación, se ejecuta el comando *mergeMeshes* tomando como máster la malla estacionaria (*nonRotatingPart*) y esclava la rotatoria (*rotatingPart*).

En la Figura 2.15 y ANEXO III. se anexa el código asociado al proceso de fusión de las mallas. Inicialmente se parte de dos directorios separadas para las mallas, seguido se crea una carpeta con el nombre final y dentro de las mismas se copia la malla máster, finalmente se aplica el comando *mergeMeshes* entre la carpeta final con la malla esclava, que fusiona ambas mallas manteniendo las características de ambas.

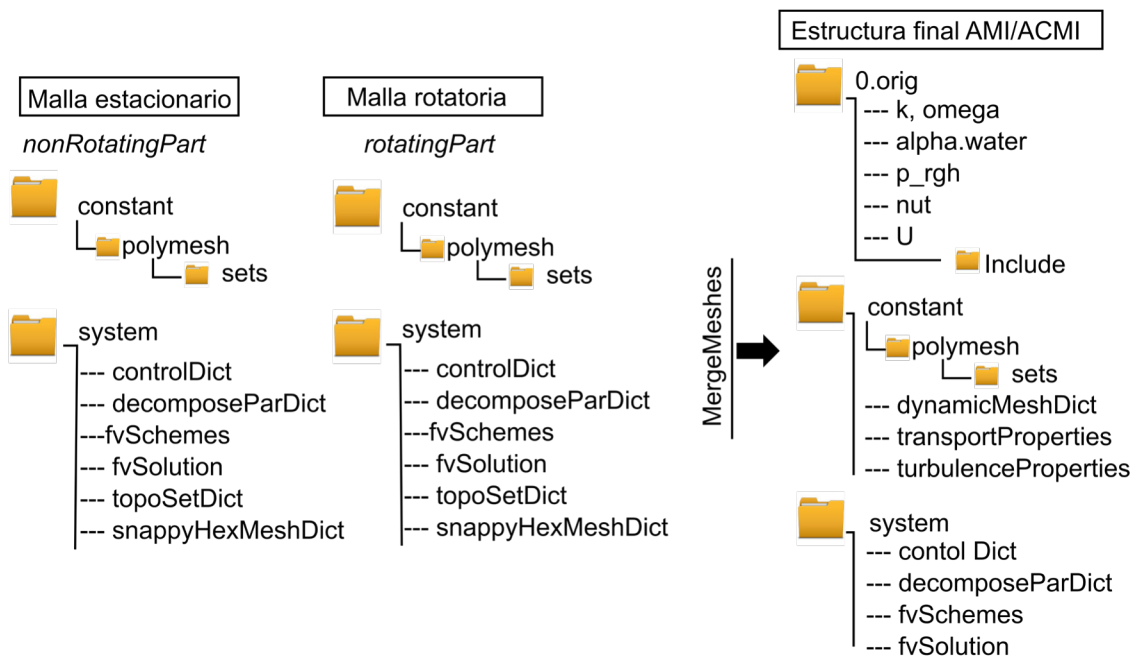


Figura 2.14 Generación de la malla final.  
 Fuente: (Propia)

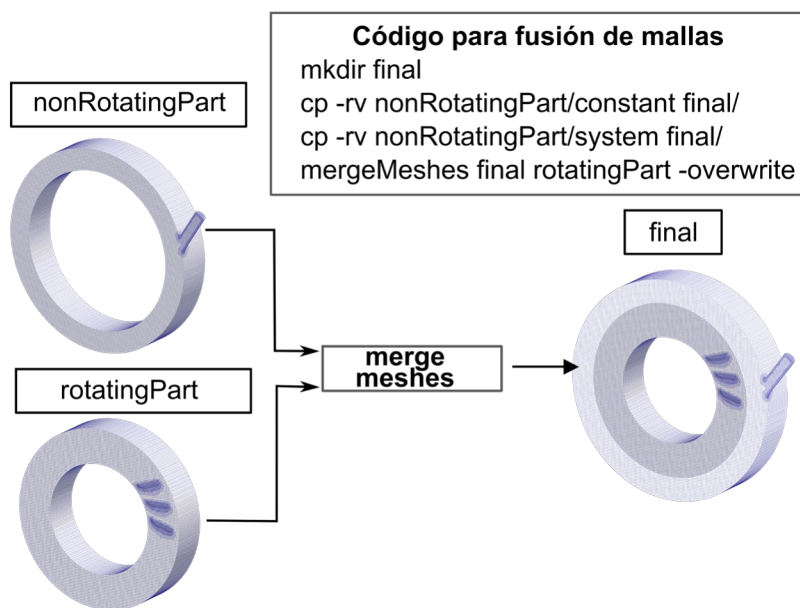


Figura 2.15 Unión de mallas mediante *mergeMesh*.  
 Fuente: (Propia)

Una vez realizadas todas estas configuraciones en la estructura del caso AMI, se puede verificar su funcionamiento y errores con el comando: *moveDynamicMesh -noFunctionObjects -checkAMI*. Si no genera ningún error esta lista para pasar al proceso de simulación. Por el contrario, la malla ACMI necesita una configuración adicional que se explica a continuación.

### 2.4.5.3. Configuración de la malla ACMI

El proceso de obtención de la malla para el caso ACMI es similar hasta lo expuesto en la sección anterior sin embargo como es conocido el algoritmo AMI no funcionaría en esta malla ya que las interfaces tienen distinta geometría. Por lo antes mencionado, se aplica una serie de comandos que se muestran en el ANEXO IV.. Como se muestra en la Figura 2.16 en la parte izquierda se tienen los límites obtenidos luego fusionar los dominios para la malla ACMI con el proceso anterior. De aquí se tiene un límite denominado interfaz que corresponde a la parte que no estará en contacto con el otro dominio y necesita ser considerado como atmósfera. Por otro lado, tenemos *connected* y *connected\_slave* que son los límites que siempre estarán en contacto para ambos dominios. Para que la malla funcione de la manera deseada es necesario aplicar el comando *createPatch* para generar nuevos límites a partir de los anteriores y borrar los que tengan cero caras, a continuación, se ejecuta nuevamente *topoSet* para convertir los límites en zonas de caras lo cual es legible para ejecutar *createBaffles*, este último permite crear la nueva configuración de la malla en base a los criterios requeridos para el método ACMI, el gráfico de la derecha de la Figura 2.16 muestra el resultado al finalizar todo el proceso, donde se obtiene cuatro *patches*, dos de ellos se repiten bajo la nominación *couple* y *blockage*, *couple* trabaja directamente para la transferencia de datos con *cyclicACMI* mientras que las partes de *blockage* tienen la condición especial de atmósfera para las zonas que no se traslapan. La geometría de estos *patch* varía en el tiempo y se recalculan para cada paso de tiempo.

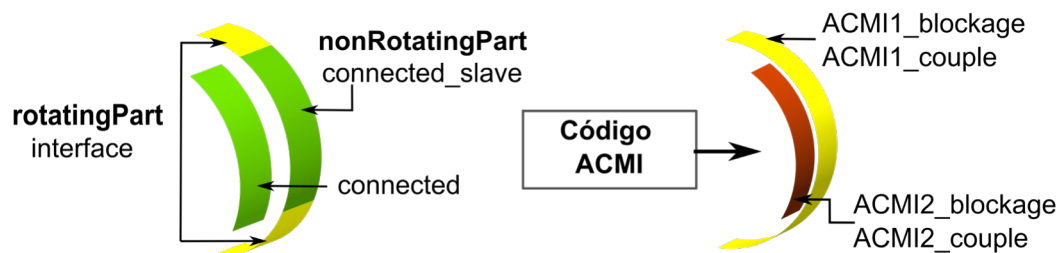


Figura 2.16 Tratamiento de interfaces ACMI.  
Fuente: (Propia)

Una vez realizadas todas estas configuraciones en la malla del caso ACMI es posible ejecutar el solver expuesto en la siguiente sección.

## 2.5. Simulación numérica en OpenFOAM

Debido a la complejidad del fenómeno en estudio se pretende prestar gran atención sobre el comportamiento y captura del flujo de superficie libre sobre los cangilones y al ingreso del chorro de agua a través del inyector.

Se escogió el solver *interFOAM* de la versión OpenFOAM-v9 que satisface las necesidades expuestas del fenómeno en estudio, es decir maneja flujo bifásico, resuelve flujos turbulentos, movimiento rotacional y acoge modelos de interfaz deslizante entre malla giratoria y estacionaria AMI y ACMI [29].

### 2.5.1. Configuración del solver *interFOAM*

Una vez seleccionado el solver para simular el fenómeno es necesario determinar los esquemas de discretización y solucionadores de ecuaciones lineales algebraicas para el control de la estabilidad y convergencia de los resultados.

Tabla 2.6. Configuración de *fvSchemes*

<b>fvSchemes</b>	
<b>ddtSchemes</b>	
default	Euler
<b>gradSchemes</b>	
default	cellLimited Gauss linear 0.5
grad(p)	Gauss Linear
<b>divSchemes</b>	
div(phi,U)	Gauss linearUpwindV cellLimited Gauss linear 0.5
div(rhoPhi,U)	Gauss limitedLinearV 1
div(phi,alpha)	Gauss vanLeer01
div(phiRb,alpha)	Gauss interfaceCompression
"div(phi,(k epsilon omega))"	Gauss linear
div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))))	Gauss linear
<b>laplacianSchemes</b>	
default	Gauss linear limited 0.5
<b>interpolationSchemes</b>	
default	linear
<b>snGradSchemes</b>	
Default	limited 0.5
<b>wallDist</b>	
method	meshWave

Fuente: (Propia)

En la Tabla 2.6 se encuentra a detalle los esquemas de discretización utilizados, especificados en el fichero *system/fvSchemes* (ANEXO I.). En resumen, se utiliza un esquema numérico implícito de primer orden transitorio para la derivada del tiempo denominado Euler. Para la discretización de los gradientes se utiliza como base el esquema numérico de *Gauss linear* de segundo orden. *Gauss vanLeer01* se especifica para *alpha.water* con el objetivo de delimitar estrictamente la fracción volumétrica de agua entre 0 y 1 [17]. Gauss linear es utilizado para la solución de los divergentes de

las variables restantes. Algunos de los esquemas numéricos utilizados están limitados a 0.5 debido a que trabajamos con una malla híbrida y no ortogonal.

Después de la discretización de los términos de las Navier-Stokes se obtienen matrices simétricas y asimétricas que necesitan ser resueltas a través de un solucionador lineal algebraico y de un método de acoplamiento entre los términos de presión y velocidad.

En el directorio *system/fvSolution* (ANEXO I.) se especifica los solucionadores mencionados, cada solucionador itera hasta que el residual de la variable alcance una tolerancia deseada y se detiene cuando: el residuo cae por debajo de la tolerancia (*tolerance*), la relación entre el residual final e inicial cae por debajo de (*reltol*) y cuando se alcanza el número máximo de iteraciones (*maxiter*), una vez cumplido el criterio pasa al siguiente paso de tiempo [17], [29].

Se ha utilizado el solver *GAMG* y *smoothSolver* para los campos de presión y velocidad respectivamente que generalmente son la opción más confiable [17]. Anexo a cada solucionador se ha seteado una tolerancia de  $1e-6$  y una tolerancia relativa de 0.1 en base a estudios previos, estos valores ayudan a obtener una adecuada precisión de la solución final, si aumentamos su valor arriesgamos precisión y estabilidad en los resultados y si lo seteamos muy bajo, el tiempo de simulación será muy elevado.

Para el acoplamiento de la ecuación de presión y velocidad se ha utilizado el algoritmo *PIMPLE* que es una combinación de *PISO* y *SIMPLE* como se menciona en la sección 1.5.5. Adicionalmente, se configuran algunos criterios dentro del algoritmo que hacen referencia a los bucles de presión, a las correcciones debido a la no ortogonalidad de la malla y al tratamiento de la interfaz fluida. Entre mayores sean los valores de esta corrección la simulación tendrá una mejor fidelidad sin embargo el costo computacional subirá de manera excesiva.

### **2.5.2. Control de simulación**

La configuración de los parámetros para la ejecución como: inicio, fin, paso de tiempo, criterios y funciones especiales de la simulación se encuentra especificados dentro del fichero *system/controlDict* (ANEXO I.). Un resumen de los parámetros más importantes se encuentra detallado en la Tabla 2.7. Adicional a esta configuración es importante mencionar que se ha usado un paso de tiempo adaptativo, lo que significa que el paso de tiempo va a variar para cumplir el criterio de Courant. Además, se ha configurado que la escritura de los resultados esté en formato binario para disminuir el tamaño de los archivos generados que van aproximadamente por las 90 Gb para todo el caso.

Tabla 2.7. Resumen de los parámetros de ejecución de la simulación.

<b>controlDict</b>		
<b>Control del tiempo de simulación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor / Parámetro</b>
startTime	Inicio de simulación	0
endTime	Fin de simulación	0.3
deltaT	Paso de tiempo de simulación	1e-6
maxCo	Maximo numero de Courant	0.9
maxDeltaT	Paso de tiempo maximo	1e-4
<b>Escritura de datos</b>		
writeControl	Control de escritura	adjustableRunTime
writeInterval	Intervalo de escritura	0.0001
writePrecision	Precisión de escritura	12
<b>Funciones y librerías</b>		
forces	Fuerzas calculas sobre A2	Forces and Moments
#includeFunc Q	Vorticidad	Q
#includeFunc yPlus	Yplus	yPlus

Fuente: (Propia)

### 2.5.3. Características del Software/hardware y calculo en paralelo.

Para este estudio se utilizó la versión 9 de OpenFOAM sobre el sistema operativo Arch Linux. El hardware utilizado fue una Workstation con procesador Xeon (R) Silver4116 de 12 núcleos y 24 hilos, su memoria RAM de 128 GB DDR42666 MHz. Adicionalmente, se ha utilizado los softwares libres: *paraview*, *Python 3* y *gnuplot* para el *post-procesamiento*.

Debido a la física del problema y a la cantidad de elementos que tienen las mallas de la turbina Pelton, llevar a cabo la simulación con núcleos en serie sería muy ineficiente y llevaría demasiado tiempo. Es por ello, que el caso se ha configurado el fichero *system/decomposeParDict* (ANEXO I.) para un trabajo en paralelo con 12 núcleos. De esta manera el tiempo de simulación disminuye significativamente. Esta herramienta permite dividir el dominio de estudio en un numero definido de partes y asignar su solución a cada núcleo físico disponible, al momento de aplicar la herramienta se asigna unas condiciones de borde genérica a los límites que se generan automáticamente al momento de dividir el dominio con el fin de intercomunicarlos de forma paralela. Al final de la simulación los procesos y la información generada se pueden reconstruir para una mejor lectura con los comandos expuestos en la sección 2.7.1.6.2. Como punto adicional es importante mencionar que el mallador *snnapyHexMesh* también puede trabajar en paralelo, así como el solver *interFOAM*.



## **2.6. Post-Procesamiento y Validación de resultados.**

Luego de configurar los casos tanto para AMI y ACMI, se procede a ejecutar la simulación en las mallas expuestas en la Tabla 2.1. Dentro de cada simulación se ha incluido las funciones que calculan el  $yPlus$ , las fuerzas y momentos generados sobre los cangilones de la turbina Pelton. Además, luego de terminada la simulación se ha ejecutado la herramienta *foamLog*, que permite extraer los valores de residuales de todas las variables, número de Courant y continuidad a partir de los datos generados durante toda la simulación.

En base a la información obtenida al final de la simulación, se ha desarrollado un postprocesamiento mediante gnuplot para graficar los residuales, número Courant y continuidad. Paraview ha sido utilizado para visualizar  $yPlus$  sobre las superficies y finalmente se ha utilizado python3 para graficar el momento sobre los cangilones.

Una vez escogidos las mallas finales para el estudio y comparación de los casos AMI y ACMI se procede validarlos en base a los datos de potencia máxima real emitida por la central hidroeléctrica "Illuchi N°2".

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. MALLADO**

#### **3.1.1. Análisis de Independencia de Malla**

Como procedimiento inicial de la simulación numérica, es necesario analizar la influencia del tamaño de malla sobre los resultados obtenidos como se explica en la sección 2.3.3. Se estudiaron cuatro tamaños diferentes de malla nombradas como M1, M2, M3, M4 con una densidad de menor a mayor como se evidencia la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 para los casos AMI y ACMI respectivamente. Como se puede observar, la tendencia de los cuatro resultados numéricos de distinto tamaño de malla es muy similar para ambos enfoques. La Figura 3.1 y Tabla 3.1 muestra las especificaciones y resultados obtenidos del momento máximo en las distintas mallas para el enfoque AMI, de las cuales se elige la malla M3 de 2.77 millones de celdas para continuar con el estudio debido a que el valor de momento máximo muestra una buena convergencia con respecto al modelo M4 y al dato real, además presenta una baja distorsión en la señal del momento respecto a las mallas menos densas, finalmente en términos de estabilidad esta malla presenta un buen comportamiento con un tiempo de simulación razonable.

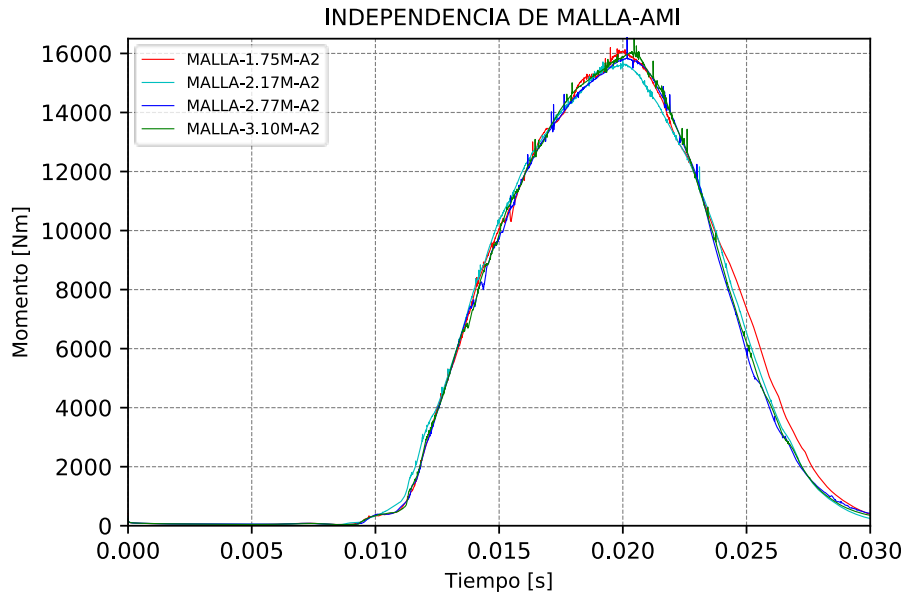


Figura 3.1. Independencia de malla AMI.  
Fuente (Propia)

Tabla 3.1. Independencia de malla caso AMI.

	Malla	Tamaño	Número	Torque	Dato
		celda base	elementos	Maximo	Real
		[mm]	[-]	[Nm]	[Nm]
AMI	M1	11	1753228	16062.7	16695.9
	M2	10	2175529	15621.8	
	M3	9	2774870	15838.5	
	M4	8.5	3137597	16035.1	

Fuente: (Propia)

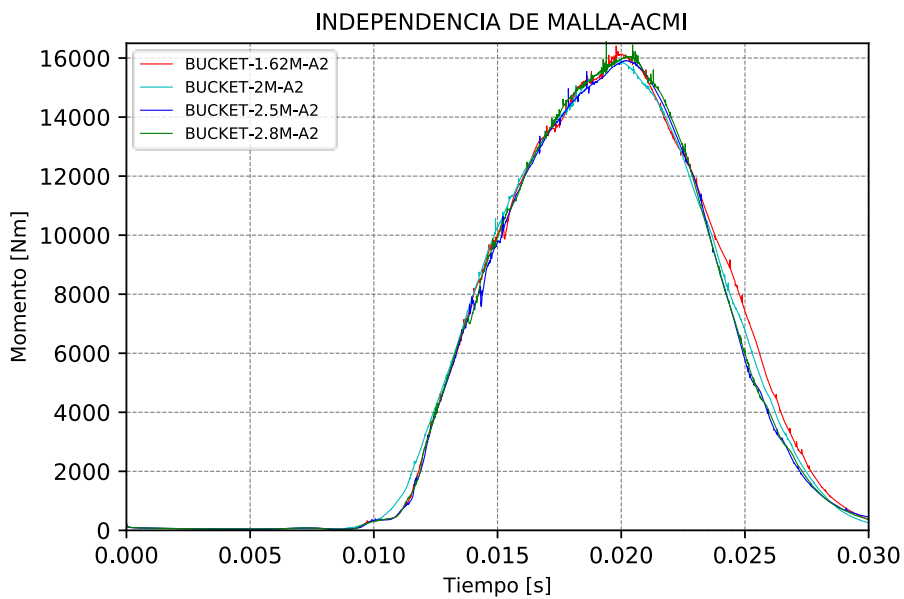


Figura 3.2. Independencia de malla ACMI.  
Fuente (Propia)

Tabla 3.2. Independencia de malla caso ACMI.

	Malla	Tamaño de celda base	Número elementos	Torque Maximo	Dato Real
		[mm]		[Nm]	[Nm]
ACMI	M1	11	1622496	16128.1	16695.9
	M2	10	2000516	15960.5	
	M3	9	2520844	15908.4	
	M4	8.5	2844124	16050.3	

Fuente: (Propia)

Para el caso del enfoque ACMI se obtuvo la Figura 3.2 y Tabla 3.2 , la cual mediante los mismos criterios de estabilidad, convergencia, distorsión del momento sobre el cangilón y tiempo de simulación se ha tomado la malla M2 con 2 millones de elementos para continuar con los estudios posteriores.

### 3.1.2. Calidad de la malla

La calidad de malla tiene una gran influencia en los resultados de una simulación numérica, algunos de los parámetros que ayudan a definir la calidad se muestran en la Tabla 3.3. En la sección 2.3.3 se explica algunos de los parámetros expuestos a continuación y se evidencia que los valores están dentro de los rangos permitidos a excepción del sesgo que debido a la complejidad de la geometría en algunos lugares se presenta un valor fuera del valor permitido pero que sale de las zonas de mayor interés del estudio, como son los fillos muy agudos.

Tabla 3.3. Calidad de malla casos AMI y ACMI.

Parámetros	AMI	ACMI
Número de elementos	2774870	2000516
Número de nodos	1527441	964520
Máx. relación de aspecto	28.9	33.68
Min. Área de superficie	7.5e-10 [m2]	3.13e-16 [m2]
Min. Volumen	1.83e-10 [m3]	1.7e-10 [m3]
Max. Oblicuidad	17.11	19
Max. No-ortogonalidad	64.99	49.33
<b>Yplus</b>	5-300	5-300

Fuente: (Propia)

Por otro lado, la Figura 3.3 muestra la distribución del Yplus sobre el cangilón a distintos ángulos de giro con respecto al eje de rotación, las zonas de interés por donde se desarrolla el fluido al chocar con el cangilón tienen valores desde 5 hasta 300 según el tiempo en que se encuentra como se visualiza en la figura mencionada. Con estos valores aseguramos que se cumpla los criterios del modelo de turbulencia  $K - \omega SST$  y por ende se solucione la función de pared asignada a la superficie del cangilón.

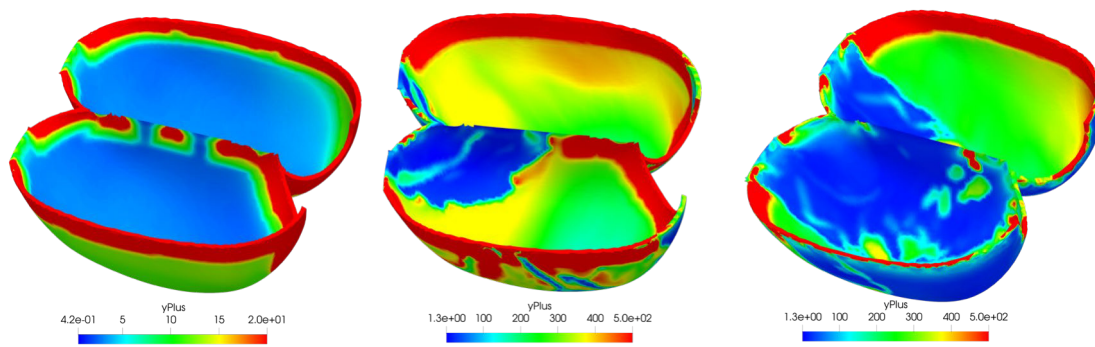


Figura 3.3. Yplus sobre la pared del cangilón A2 a 20° , 45° y 60°.  
Fuente: (Propia)

## 3.2. Convergencia y estabilidad

Los residuales son valores que resultan de la solución numérica de las ecuaciones de conservación en cada iteración y paso de tiempo, son un indicador del comportamiento convergente o divergente de la simulación. Básicamente el residual es la diferencia del valor de una variable entre una y otra iteración seguida. En base a varios autores, un residual bajo no significa un buen resultado y un residual alto tampoco significa un mal resultado, sin embargo, cuando los valores tienden a mantenerse o estar por debajo de  $1e^{-3}$ , es señal de convergencia y un buen punto inicial para considerar los resultados [28]. Los residuales, continuidad y el número de Courant son parámetros que van de la mano y sirven para evaluar la convergencia y estabilidad de la simulación. A continuación, se exponen las gráficas para los enfoques AMI y ACMI de los parámetros mencionados.

### 3.2.1. Simulación numérica – AMI

La Figura 3.4 muestra el valor inicial y final de los residuales para el caso AMI, el residual final se genera debido a las correcciones adicionales que se ha ingresado en la configuración de los solucionadores de ecuaciones algebraicas con el fin de obtener una mejor precisión de los resultados. Los valores de residual inicial para las distintas variables como son velocidad en las tres componentes, presión, k y omega están por debajo del valor  $1e^{-3}$  indicando que la simulación muestra un buen comportamiento, por otro lado, como se configuro una solución más robusta se evidencia que al final de realizar la corrección de la ecuación de presión los residuales en cada iteración presentan valores por debajo de  $1e^{-7}$ .

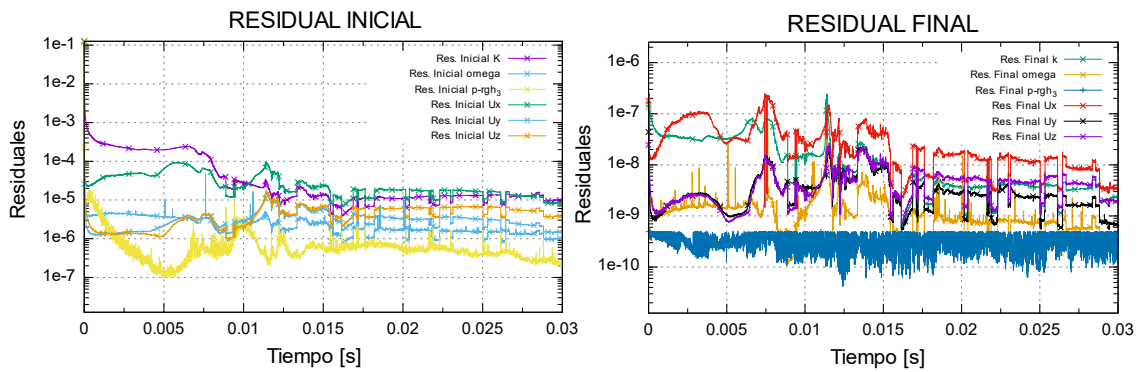


Figura 3.4. Residual inicial y final de la simulación numérica con el enfoque AMI.  
Fuente: (Propia)

La Figura 3.5a muestra el valor del número de Courant durante todo el tiempo de simulación, debido a los criterios mencionados en la sección 1.5.3, la simulación del caso AMI está debidamente controlada y representa un comportamiento real debido a que su valor esta siempre por debajo del número de Courant máximo permitido igual a 1. La grafica de este parámetro es variable en el tiempo debido a que como condición se ha configurado un paso de tiempo ajustable a la turbulencia o complejidad generada por el fenómeno, es decir en ciertos tiempos el fenómeno es más o menos caótico lo cual se vuelve más fácil o complejo solucionar el problema.

Por otro lado, la Figura 3.5b muestra la gráfica de continuidad que indica que la diferencia del flujo que ingresa es muy similar al flujo que sale del dominio con una diferencia en la escala de  $1e-14$ . La teórica indica que entre más cercano sea el valor a cero más precisa es la solución.

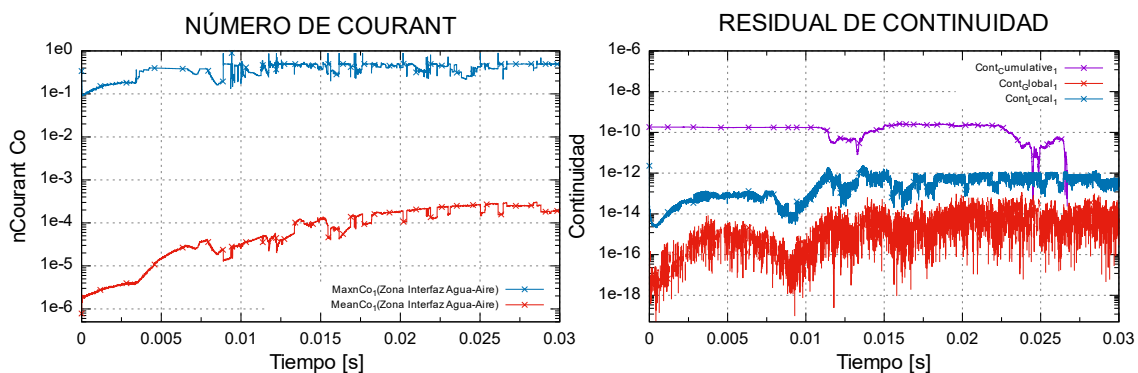


Figura 3.5. a) Gráfica del N. Courant y b) Gráfica de residual de continuidad del enfoque AMI.  
Fuente: (Propia)

Basado en las gráficas analizadas para el caso AMI los resultados de la simulación numérica pueden ser considerados debido a que presentan buenos parámetros de convergencia en el tiempo y una adecuada estabilidad.

### 3.2.2. Simulación numérica – ACMI

La Figura 3.6 muestra los valores residuales de la simulación numérica ACMI, los valores residuales iniciales están debajo de  $1e-4$  y los finales por debajo de  $1e-6$  lo cual indica que existe una buena convergencia de resultados en cada paso de tiempo.

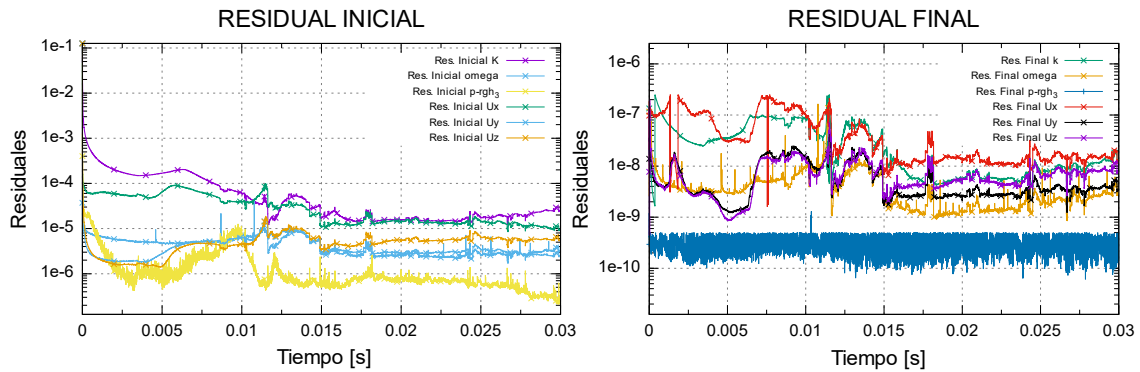


Figura 3.6. Residual inicial y final de la simulación numérica con el enfoque ACMI.  
Fuente: (Propia)

La Figura 3.7a perteneciente a la simulación ACMI evidencia que el valor de número de Courant máximo está por debajo del valor máximo permitido al igual que el Courant promedio en valores de  $1e-1$  y  $1e-3$  respectivamente. Por otro lado, los valores de continuidad global están por debajo de  $1e-10$  lo cual indica que existe una buena resolución de la física del problema.

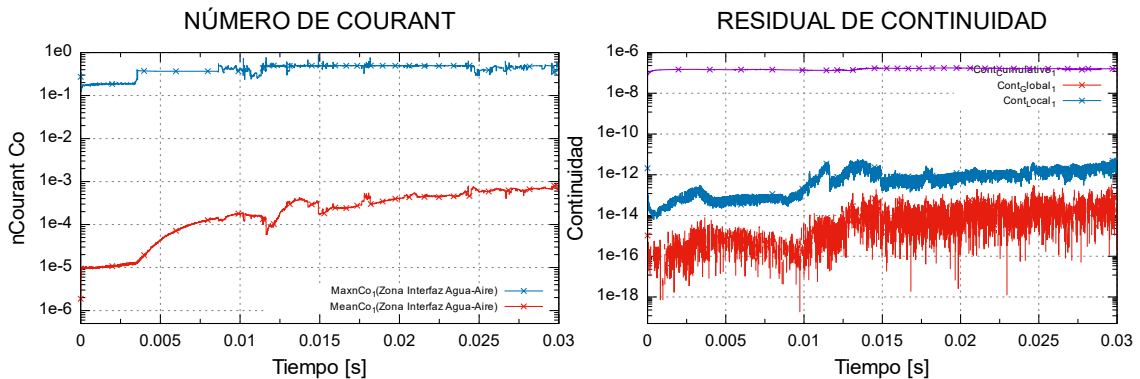


Figura 3.7. a) Gráfica del N. Courant y b) Gráfica de residual de continuidad del enfoque ACMI.  
Fuente: (Propia)

En base a las gráficas expuesta del caso ACMI, esta presenta valores adecuados de convergencia en el tiempo y estabilidad, por ende, los resultados de la simulación numérica pueden ser considerados como solución del fenómeno. Las gráficas tanto para el caso AMI y ACMI escogidos para análisis presentan características muy similares en valores y tendencias, esto es un buen indicio sobre la similitud que presentaran en la solución.

### 3.3. Comparación y validación del Torque máximo en la simulación AMI y ACMI.

La Figura 3.8 muestra la curva del torque generado sobre el cangilón A2 para ambos casos AMI y ACMI, con las mallas escogidas se puede obtener una curva con baja distorsión y los valores máximos tienden a ser muy similares como se muestra en la Tabla 3.4. Con ambos métodos, la predicción del comportamiento del fluido es muy similar basados en la curva que traza el torque mientras el chorro de agua interactúa con el cangilón. La diferencia entre ellos es muy pequeña y en comparación con los datos reales del ANEXO XI. de la planta “Illuchi N°2”, el error obtenido mediante la expresión (44) del momento máximo es de 5.41% y el 4.61% para el caso AMI y ACMI respectivamente, lo cual es aceptable para concluir que la simulación adopta y reproduce el fenómeno analizado en este estudio. Es importante también mencionar que la curva presentada tiene un comportamiento similar a varios estudios previos [17], [19], [20], [22], [23] y a la curva de eficiencia mostrada en la sección 1.4.4.

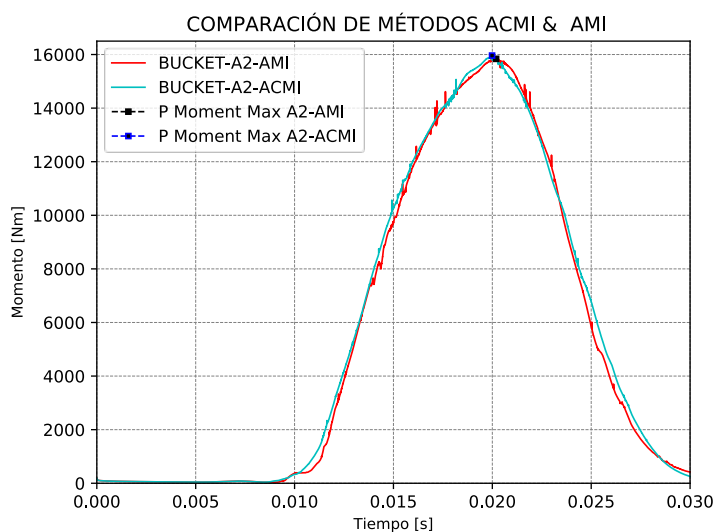


Figura 3.8. Comparación y validación de resultados  
Fuente: (Propia)

$$\%Error = \frac{|(Momento Max.)_{Exp.} - (Momento Max)_{Num.}|}{(Momentos Max)_{Exp.}} \times 100\% \quad (44)$$

Tabla 3.4. Comparación y Validación de resultados.

Enfoque	Número de elementos	Momento máximo	Dato real	Error
	[-]	[Nm]	[Nm]	[%]
AMI	2774870	15838.5	16695.9	5.41
ACMI	2000516	15960.5		4.61

Fuente: (Propia)

En base a los resultados antes expuestos, la simulación numérica queda validada tanto para el caso AMI y ACMI de tal manera que la metodología, configuraciones y solución pueden ser usadas para los siguientes análisis y futuros trabajos.

### 3.4. Comportamiento del fluido sobre los cangilones

La Figura 3.9 muestra un esquema de la ubicación del cangilón de análisis en la posición angular igual a  $0^\circ$  y a partir de ahí girara  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $60^\circ$  para evaluar el comportamiento del fluido en dichas posiciones, la ubicación está determinada respecto a un eje tangencial que sale a partir de un círculo inscrito desde el centro de origen de rotación.

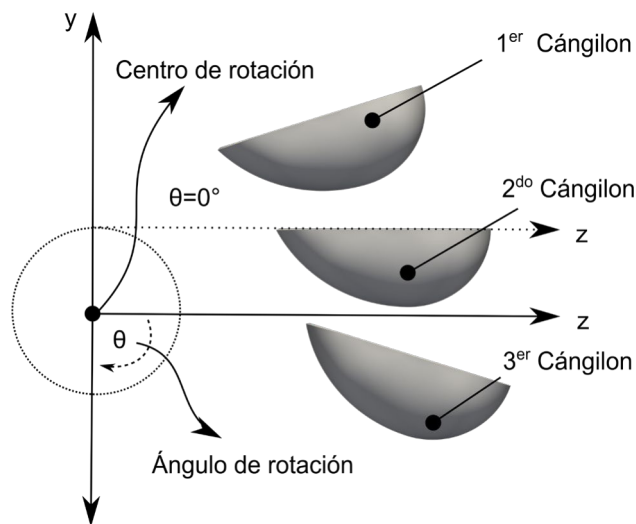


Figura 3.9. Ubicación del cangilón A2.  
Fuente: (Propia)

La Figura 3.10 muestra los contornos de la fase de agua igual a  $\alpha_w = 0.8$  en diferentes ángulos de rotación para ambos casos, es evidente que el desarrollo del fluido es muy similar para ambos casos para cada posición, únicamente hay diferencia debido a que parte de la fase de agua sale del dominio ACMI y por lo tanto no se evidencia como en el caso AMI.

En la Figura 3.11 se anexa sobre el contorno de agua el campo de presiones en cada posición angular estudiada, de igual manera se puede observar que los valores están en el mismo rango para ambos casos AMI y ACMI. Se observa que la zona de mayor presión se encuentra en la zona de cambio de dirección del flujo causado por el impacto del chorro a la superficie interna del cangilón. Además, se puede observar que la transferencia de datos en la interfaz entre el dominio estacionario y rotatorio no presenta pérdida de energía de algún tipo o distorsión en los campos.



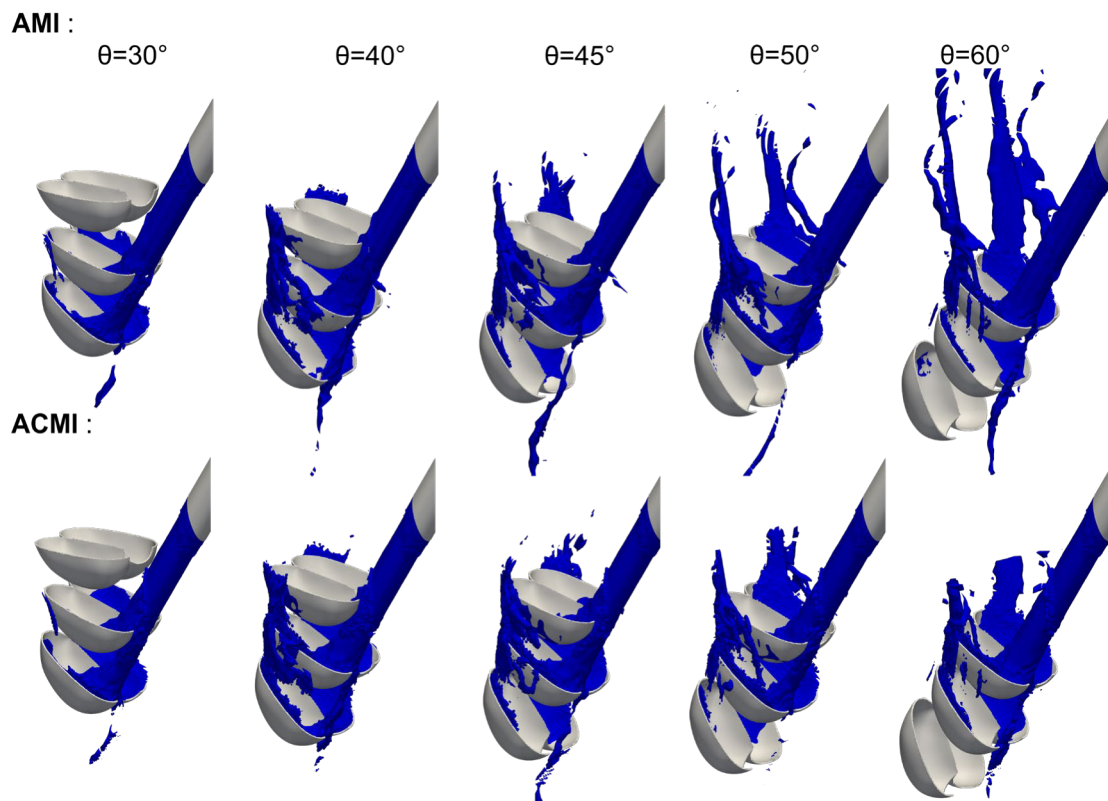


Figura 3.10. Contornos de  $\alpha_{water} = 0.8$  para el caso AMI y ACMI.  
Fuente: (Propia)

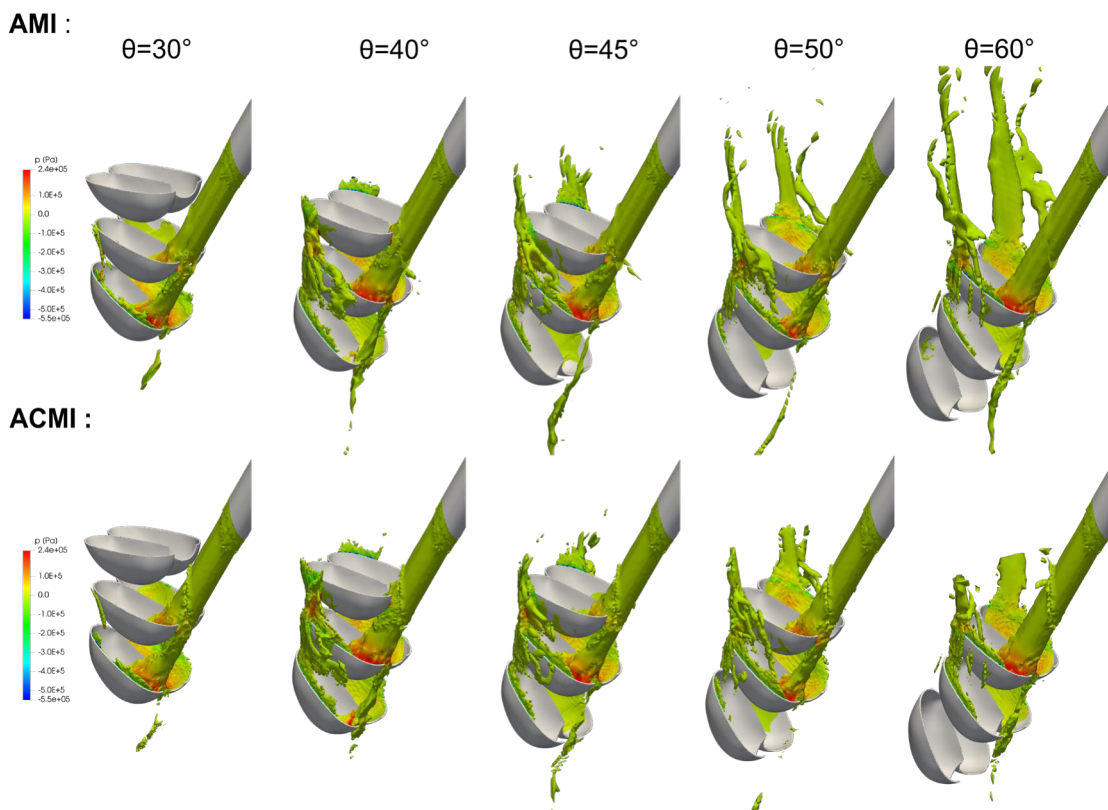


Figura 3.11. Contornos de  $\alpha_{water} = 0.8$  con distribución de presión en el caso AMI y ACMI.  
Fuente: (Propia)

La Figura 3.12 muestra la velocidad superficial del contorno de agua en varias posiciones, como es conocido en base a los datos reales la velocidad del chorro a la salida del inyector tiene un valor de 76.916 [m/s] y en la simulación numérica se puede evidenciar que el valor máximo va por los 77 [m/s] a la salida del inyector mostrando una gran similitud. El chorro cambia de dirección y disminuye de velocidad de forma brusca al momento de chocar con la superficie interna del cangilón y por ende en base a los principios físicos la presión aumenta en esas zonas como se observó en la figura anterior. De igual manera se puede observar que los perfiles de velocidad son muy similares para ambos casos. Se puede observar una pequeña distorsión en la interfaz del caso ACMI que podría ser estudiada en trabajos futuro sin embargo según la curva de momento no genera mayor cambio o pérdida de energía en el momento generado sobre el cangilón.

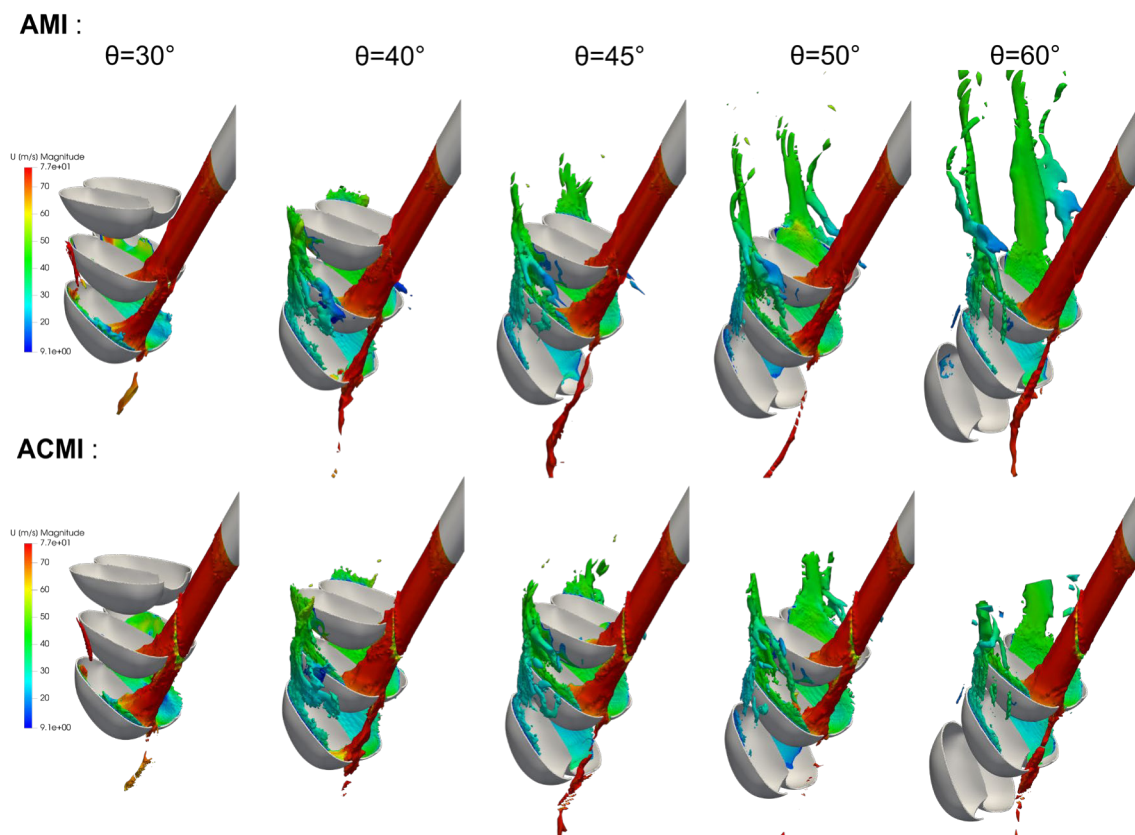


Figura 3.12. Contornos de  $\alpha_{water} = 0.8$  con distribución de velocidad en el caso AMI y ACMI.  
Fuente: (Propia)

### 3.5. Comparación de tiempo y recursos computacionales

En la Tabla 3.5 se puede observar el número de elementos y el tiempo de simulación de los casos finales. La malla ACMI al partir de un dominio más reducido presenta un

menor número de elementos que la malla AMI lo que se traduce en un menor tiempo de uso de recursos computacionales. El caso AMI conlleva un tiempo de 23.04 horas mientras que ACMI se lleva a cabo en 9.06 horas, en base a lo anterior AMI por trabajar con un dominio más grande y mayor número de elementos se demora 2.54 veces más que ACMI obteniendo resultados muy similares. Desde otro punto de vista es posible otorgar una densidad de malla mayor al dominio ACMI con el fin de obtener un mejor detalle y comportamiento del fluido en las cercanías de las paredes e igualar los recursos y el tiempo necesarios para desarrollar un caso con la técnica AMI, pero con un mejor resultado. Por lo tanto, en términos de recurso computacionales y tiempo de simulación el método ACMI representa una mejor alternativa en comparación con AMI para llevar a cabo estudios de turbinas Pelton

Tabla 3.5. Comparación de recursos computacionales

Enfoque	Número de elementos	Tiempo de simulación	
	[-]	[s]	[h]
AMI	2774870	82960	23.04
ACMI	2000516	32609	9.06

Fuente: (Propia)

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

En el presente estudio se definió una metodología de estudio de turbinas tipo Pelton mediante las técnicas AMI y ACMI, que permite obtener un buen análisis y evaluación del comportamiento dinámico del fluido sobre los cangilones para posteriormente ser extrapolado en términos de optimización y mejora de su geometría.

Se desarrollo un dominio geométrico 3D adecuado con todas las características expuestas en este estudio, útil al momento de aplicar la técnica deseada AMI o ACMI.

La aplicación de refinamientos en las zonas de interés como son las paredes del inyector y cucharas, además de la aplicación puntual de layers sobre los cangilones, permiten obtener una malla con parámetros de calidad aceptables y con un yPlus entre 5-300 que es útil para que se cumplan los criterios del modelo de turbulencia K-w SST.

Las mallas escogidas de 2.77 millones para el caso AMI y 2.0 millones para el caso ACMI después del estudio de independencia de malla presentan una gran estabilidad, convergencia y continuidad en los resultados finales, es decir los valores para el residual inicial, final y de continuidad están por debajo de  $1e-3$ ,  $1e-7$  y  $1e-12$  respectivamente.

Las simulaciones numéricas finales del método AMI y ACMI obtuvieron un error relativo respecto al valor de momento máximo real de 5.41% y 4.61 % respectivamente, siendo un valor aceptable en términos de validación de resultados, además es importante mencionar que la tendencia de las curvas presentadas del momento sobre el cangilón A2 presentan características muy similares al comportamiento idóneo de una turbina Pelton.

En base a los resultados obtenidos es evidente que los dos métodos pueden reproducir el fenómeno de forma adecuada y bajo una misma condición de trabajo el fenómeno se comporta de manera muy similar como se observa en los perfiles de velocidad, presión y contornos de agua.

El caso desarrollado mediante el enfoque ACMI se puede desarrollar con menos elementos debido a que el dominio computacional es más pequeño y por lo tanto el tiempo de simulación requerido es menor. La malla ACMI con una densidad 28 % menor que la de AMI, se puede obtener resultados en un tiempo de 2.54 veces más rápido respecto al tiempo utilizado en AMI.

El método ACMI es ideal para ser aplicado en el estudio de turbinas Pelton gracias a su óptimo funcionamiento y ahorro de recursos computacionales frente al método tradicional utilizado AMI.

## **4.2. Trabajos futuros**

OpenFOAM presenta una gran variedad de herramientas de tipo matemáticas para mejorar el comportamiento de la simulación numérica en términos de estabilidad, convergencia y precisión de resultados. El presente trabajo indica una metodología que puede ser mejorada por varios puntos, principalmente es necesario estudiar los parámetros que definen el comportamiento de la interfaz agua-aire en trabajos futuros.

Basados en los resultados expuestos en el presente trabajo se puede extrapolar los resultados para evaluar posibles daños generados en las cucharas de la turbina debido al efecto erosivo provocado por sedimentos que son transportados por el fluido de trabajo.

Es necesario mejorar el diseño del cangilón para obtener un comportamiento de la curva más eficiente, capturar la mayor cantidad de energía proveniente del chorro y finalmente alcanzar un mayor momento máximo generado.

Desarrollar la simulación con un inyector bajo las simplificaciones expuestas en este trabajo es útil para ciertos estudios, sin embargo, sería importante simular la totalidad de inyectores con la totalidad de cucharas para entender de mejor manera el funcionamiento de la turbina y lo que pasa dentro de la carcasa, además sería interesante aplicar técnicas de 6DoF para observar de mejor manera más escenarios posibles, aunque la limitación más importante es el recurso computacional.

Finalmente, se debería considerar para siguientes estudios el desarrollo de un diseño experimental de un banco de pruebas para turbinas Pelton y de esa manera obtener más información del modelo a escala y compararlo con la simulación numérica para llegar a criterios de diseño más concretos.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia de Regulacion y Control de Recurso Renovables and Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, “Balance Nacional de Energía Eléctrica -Año móvil con corte a Octubre 2021,” 2021. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
- [2] R. Yepez, Y. Ji, M. Hallack, and D. Soto, *¡A todas luces!, La electricidad en America LATina y El Caribe 2040*. 2019.
- [3] P. Breeze, “Hydropower Turbines,” in *Hydropower*, Elsevier, 2018, pp. 35–46. doi: 10.1016/b978-0-12-812906-7.00004-1.
- [4] Mei Zu-yan, *Mechanical Design and Manufacture of Hydraulic Machinery*, 1st ed. London, 2019.
- [5] V. Hidalgo *et al.*, “Optimization of a Pelton impeller geometry for particulate flow using numerical simulation,” *Materials Today: Proceedings*, no. August, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.495.
- [6] V. Hidalgo *et al.*, “Simplified simulation of a small Pelton turbine using OpenFOAM,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 774, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/774/1/012075.
- [7] G. Barragán and Carlos. Parra, “Optimizacion de la geometría de un rodete tipo pelton para flujo particulado utilizando simulación numérica.,” ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2020.
- [8] Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, “Resumen ejecutivo - Plan Maestro de Electricidad,” 2021. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- [9] T. B. A. Couto and J. D. Olden, “Global proliferation of small hydropower plants – science and policy,” *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 16, no. 2, pp. 91–100, Mar. 2018, doi: 10.1002/fee.1746.
- [10] N. R. Fulbright, “Financial institutions Energy Infrastructure, mining and commodities Transport Technology and innovation Life sciences and healthcare Renewable energy in Latin America,” 2017. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.nortonrosefulbright.com/>

/media/files/nrf/nrfweb/imported/renewable-energy-in-latin-america.pdf?revision=66edb636-af27-43d7-8c44-c65564b1833b&revision=66edb636-af27-43d7-8c44-c65564b1833b

- [11] ARCONEL, "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2020," 2020. Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/09/Estadistica-2020-baja.pdf>
- [12] C. Mora, "Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la central hidroeléctrica San Francisco -Ecuador," 2018.
- [13] E. Guascal and P. Quispe, "Desarrollo y estudio de una mallado estructurado optimizado para una turbina tipo Francis con validación experimental.," 2019.
- [14] R. Velasco, "Estudio de mallado estructurado 3D rotativo en openFOAM para aplicaciones en turbinas tipo Francis," ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2020.
- [15] J. A. Sarmiento, "Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico.," ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2020. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20949>
- [16] H. Alvarez, "Estudio paramétrico de ángulos directrices y triángulos de velocidades de la cuchara de la turbina pelton para la generación de energía eléctrica a pequeña escala," ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2020.
- [17] J. R. Rygg, "CFD Analysis of a Pelton Turbine in OpenFOAM," 2013. Accessed: May 08, 2022. [Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/235212>
- [18] A. Židonis and G. A. Aggidis, "State of the art in numerical modelling of Pelton turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 135–144, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.037.
- [19] Z. Zhang, "Pelton Turbines," 2016.
- [20] A. Perrig, "Hydrodynamics of the free surface flow in pelton turbine buckets.," 2007. Accessed: May 08, 2022. [Online]. Available: <https://infoscience.epfl.ch/record/95927>

- [21] R. Rajput, *A textbook of fluid mechanics and hydraulic machines in S.I units*. 2011. [Online]. Available: [www.EasyEngineering.net](http://www.EasyEngineering.net)
- [22] K. Furnes and B. W. Solemslie, "Flow in Pelton turbines," 2013.
- [23] A. K. Rai, A. Kumar, and T. Staubli, "Hydro-abrasive erosion in Pelton buckets: Classification and field study," *Wear*, vol. 392–393, pp. 8–20, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.08.016.
- [24] J. Fernandez, *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos*. 2012.
- [25] J. H. Ferziger and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics," 2002.
- [26] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition," 2007. [Online]. Available: [www.pearsoned.co.uk/versteeg](http://www.pearsoned.co.uk/versteeg)
- [27] F. White, *Viscous\_Fluid\_Flow\_3rd\_White*. 2006.
- [28] C. Poveda and S. Simbaña, "Estudio numérico y experimental de caudales óptimos para secado de grano de cacao.," 2018.
- [29] C. Greenshields, "OpenFOAM The OpenFOAM Foundation User Guide," 2021. [Online]. Available: <https://openfoam.org>
- [30] V. Hugo and H. Diaz, "Numerical study on unsteady cavitating flow and erosion based on homogeneous mixture assumption," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303774064>
- [31] P. E. Farrell and J. R. Maddison, "Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 200, no. 1–4, pp. 89–100, 2011, doi: 10.1016/j.cma.2010.07.015.
- [32] P. E. Farrell and M. D. Piggott Christopher C Pain Gerard J Gorman, "Galerkin projection of discrete fields via supermesh construction," 2009, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10044/1/5515>
- [33] H. Jasak, "Dynamic Mesh Handling in OpenFOAM," *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, no. January 2009, 2009, doi: 10.2514/6.2009-341.



## ANEXOS

### ANEXO I.

#### CONFIGURACIONES DEL CASO OPENFOAM AMI Y ACMI.

##### CODIGO BLOCKMESH

```
/*-----*\
///// *=====*\
//||      =====      |      Hydraulic Research      ||//\
//||      /      \      E      |      GNU Toolbox      ||//\
//||      || H.R ||      P      |      Version: 1.0      ||//\
//||      \      /      N      |      Mail:stalyn.simbana@epn.edu.ec||//\
//||      =====      |      ||//\
///// *=====*\
////////////////////////////////////\
\*-----*\
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location system;
    object blockMeshDict;
}

convertToMeters 1;
vertices
(
    ( -0.01 -0.5999999737739563 -0.5999999737739563)
    ( 0.26 -0.5999999737739563 -0.5999999737739563)
    ( 0.26 0.6000000262260436 -0.5999999737739563)
    ( -0.01 0.6000000262260436 -0.5999999737739563)
    ( -0.01 -0.5999999737739563 0.6000000262260436)
    ( 0.26 -0.5999999737739563 0.6000000262260436)
    ( 0.26 0.6000000262260436 0.6000000262260436)
    ( -0.01 0.6000000262260436 0.6000000262260436)
);
blocks
( hex ( 0 1 2 3 4 5 6 7) ( 27 120 120) simpleGrading ( 1 1 1));
edges
( );
patches
( wall ffminx (( 0 4 7 3))
  wall ffmaxx (( 1 2 6 5))
  wall ffminy (( 0 1 5 4))
  wall ffmaxy (( 3 7 6 2))
  wall ffminz (( 0 3 2 1))
  wall ffmaxz (( 4 5 6 7))
);
mergePatchPairs
( );
spacing 0.01;
```

## CODIGO SNNAPYHEXMESH

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O p e r a t i o n      | Version: 9.0 |
| \\      / A n d      | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \\\    / M a n i p u l a t i o n      |
|*-----*\
| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022 |
| www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122 |
|*-----*\
FoamFile
{
    version      3.0;
    format        ascii;
    class         dictionary;
    location      "mesh/component2/system";
    object        snappyHexMeshDict;
}
// * * * * *
* * * //

castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true;

geometry
{
    AMI2.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      AMI2;
    }
    A1.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      A1;
    }

    A2.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      A2;
    }
    A3.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      A3;
    }

    ROT-SYM.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;
        name      ROT-SYM;
    }
    ROT-WALL.stl
    {
        type      triSurfaceMesh;

```

```

        name          ROT-WALL;
    }
    ROT-INT.stl
    {
        type          triSurfaceMesh;
        name          ROT-INT;
    }
};

castellatedMeshControls
{
    maxLocalCells 1000000000;
    maxGlobalCells 1000000000;
    minRefinementCells 15;
    maxLoadUnbalance 0.10;
    nCellsBetweenLevels 3;
    features
    (
        //      { file "A1.eMesh"; level 2; }
        //      { file "A2.eMesh"; level 2; }
        //      { file "A3.eMesh"; level 2; }
    );

    refinementSurfaces
    {
        AMI2 { level (0 0); patchInfo { type patch; } }
        A1  { level (2 2); patchInfo {type wall;} }
        A2  { level (2 2); patchInfo {type wall;} }
        A3  { level (2 2); patchInfo {type wall;} }
        ROT-WALL { level (0 0); patchInfo {type patch;} }
        ROT-INT { level (0 0); patchInfo {type patch;} }
        ROT-SYM { level (0 0); patchInfo {type symmetry;} }
    }
    refinementRegions
    {
    }
    resolveFeatureAngle 30;
    locationInMesh ( 0.123889 0.416873 0.0485828);
    allowFreeStandingZoneFaces true;
}
snapControls
{
    nSmoothPatch 3;
    tolerance 2.0;
    nSolveIter 30;
    nRelaxIter 5;
    nFeatureSnapIter 10;
    implicitFeatureSnap true;
    explicitFeatureSnap true;
    multiRegionFeatureSnap true;
}
addLayersControls
{
    relativeSizes true;
    layers
    {
        {
        A1      { nSurfaceLayers 10;}
        A2      { nSurfaceLayers 10;}
        A3      { nSurfaceLayers 10;}
        }
    }
}

```

```

expansionRatio 1.1;
finalLayerThickness 0.2959007323;
minThickness 0.0003137269;
nGrow 0;
featureAngle 120;
nRelaxIter 25;
nSmoothSurfaceNormals 10;
nSmoothNormals 15;
nSmoothThickness 10;
maxFaceThicknessRatio 0.3;
maxThicknessToMedialRatio 0.5;
minMedianAxisAngle 90;
nBufferCellsNoExtrude 0;
nLayerIter 50;
nRelaxedIter 25;
minMedialAxisAngle 90;
}
meshQualityControls
{
    maxNonOrtho 65;
    maxBoundarySkewness 20;
    maxInternalSkewness 4;
    maxConcave 80;
    minVol 1e-16;
    minTetQuality -1e+30;
    minArea 1e-13;
    minTwist 0.02;
    minDeterminant 0.001;
    minFaceWeight 0.02;
    minVolRatio 0.01;
    minTriangleTwist -1;
    nSmoothScale 4;
    errorReduction 0.75;
    relaxed
    {
        maxNonOrtho 75;
    }
}
mergeTolerance 1e-6;
// ***** //

```

## CODIGO TOPOSET

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O peration  | Version: 9.0 |
| \\      / A nd        | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \\\    / M anipulation |
|-----*\
| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022 |
| www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122 |
|-----*\
FoamFile
{
    version      3.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "mesh/component2/system";
    object       topoSetDict;
}
// *****
*** //

actions
(
    {
        name rotorSet;
        type cellSet;
        action clear;
    }
    {
        name rotorSet;
        type cellSet;
        action invert;
    }
    {
        name rotor;
        type cellZoneSet;
        action new;
        source setToCellZone;
        sourceInfo
        {
            set rotorSet;
        }
    }
);

// *****
//
```

## CODIGO FVSCHEMES

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 9.0 |
| \\      /  A nd        | Web: www.OpenFOAM.org |
|  \\    /  M anipulation | |
|-----*-----*|
| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022 |
| www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122 |
|-----*-----*|
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *
ddtSchemes
{
    default Euler;
}
gradSchemes
{
    default      cellLimited Gauss linear 0.5;
    grad(p)      Gauss linear;
    grad(U)      Gauss linear;
}
divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss linearUpwindV cellLimited Gauss linear 0.5;
    div(rhoPhi,U) Gauss limitedLinearV 1;
    div(phi,alpha) Gauss vanLeer01;
    div(phi_r,b,alpha) Gauss interfaceCompression;
    div(phi,nuTilda) Gauss upwind;
    div(phi,k)   Gauss linear;
    div(phi,omega) Gauss linear;
    div(phi,epsilon) Gauss linear;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear limited 0.5;
}
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
snGradSchemes
{
    default      limited 0.5;
}
wallDist
{
    method meshWave;
}

```

```

fluxRequired
{
    default          no;
    pcorr;
    p_rgh;
    alpha;
}
// *****

```

## CODIGO CONTROLDICT

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|  \ \ /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|  \ \ /  O p e r a t i o n | Version: 9.0 |
|  \ \ /  A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org |
|  \ \ /  M a n i p u l a t i o n | |
|-----*-----*\
| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022 |
| www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122 |
|-----*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// *****
application      interFoam;
startFrom        latestTime;
startTime        0;
stopAt           endTime;
endTime          0.03;
deltaT           1e-6;
writeControl     adjustableRunTime;
writeInterval    0.0001;
purgeWrite       0;
writeFormat      binary;
writePrecision   12;
writeCompression off;
timeFormat       general;
timePrecision    12;
runTimeModifiable yes;
adjustTimeStep  yes;
maxCo            0.9;
maxAlphaCo       0.5;
maxDeltaT        1e-4;
libs
(
    "libforces.so"
);
functions
{
    forcesA2
    {
        type forces;
        libs ("libforces.so");
    }
}

```







```

        k [ 0 0 1 0 0 0 0 ] 99.6;
        n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.1003;
    }
}
sigma [1 0 -2 0 0 0 0] 0.0728;

// ***** //

```

## CODIGO TURBULENCEPROPERTIES

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: 9.0 |
| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M anipulation |
|*-----*\
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "constant";
    object turbulenceProperties;
}
// * * * * * //
simulationType RAS;
RAS
{
    // Tested with kEpsilon, realizableKE, kOmega, kOmegaSST, v2f,
    // ShihQuadraticKE, LienCubicKE.
    RASModel kOmegaSST;
    turbulence on;
    printCoeffs on;
}

//***** //

```

## ANEXO II. SCRIPT PARA MALLADO

```
#!/bin/bash
#-----
#/////*=====*/\#
#//||      =====      |      Hydraulic Research      ||/\#
#//||      /      \      E      |      GNU Toolbox      ||/\#
#//||      ||  H.R  ||      P      |      Version: 1.0      ||/\#
#//||      \      /      N      |      Mail:stalyn.simbana@epn.edu.ec||/\#
#//||      =====      |      ||/\#
#////\/*=====*/\#
|  File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022  |
|  www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122  |
\*-----*/
cd ${0%/*} || exit 1
clear
foamVersion="OpenFOAM-9.0"
source s_clean1
source .colors
source .titles
    echo "BY S.F.S.C"
#-----
echo -e "\n
Start meshing
-----"
rm -f log.* > /dev/null 2>&1
rm -rf processor*> /dev/null 2>&1
#-----
echo -e "    - Create background mesh"
blockMesh >> log.blockMesh
#-----
echo -e "    - Extract feature edges"
#surfaceFeatureExtract >> log.Meshing
#-----
echo -e "    - Decompose"
decomposePar >> log.decomposePar
#-----
echo -e "    - Meshing with snappyHexMesh (~ 10 seconds)"
snappyHexMesh -overwrite >> log.snappyHexMesh
#-----
echo -e "    - Reconstruct Mesh"
reconstructParMesh -constant >>log.reconstructParMesh
#-----
echo -e "    - Set Cell"
topoSet >> log.topoSet
#-----
echo -e "    - CheckMesh"
checkMesh >> log.checkMesh
#-----
echo -e "\n
-----
End Meshing\n "
#-----
```

## ANEXO III.

### SCRIPT PARA UNIR MALLAS

```
#!/bin/bash
#-----
#////////*=====*\#
#//||      =====      |      Hydraulic Research      ||/\#
#//||      /      \      E      |      GNU Toolbox      ||/\#
#//||      || H.R ||      P      |      Version: 1.0      ||/\#
#//||      \      /      N      |      Mail:stalyn.simbana@epn.edu.ec||/\#
#//||      =====      |      ||/\#
#///\*=====*\#
#| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022      |#
#|      www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122      |#
#\*-----*\#
cd ${0%/*} || exit 1

clear
foamVersion="OpenFOAM-4.1"

source mergeMeshes
    #echo " Caso anterior Borrado"
source .colors
    #echo " Color de mi preambulo"
source .titles
    echo "BY S.F.S.C"
rm -f log.* > /dev/null 2>&1
echo "Merging meshes..."
cd mesh/
rm -r final > /dev/null 2>&1
mkdir final
cp -rv nonRotatingPart/constant final/ > ../log.finalMesh-cp 2>&1
cp -rv nonRotatingPart/system final/ >> ../log.finalMesh-cp 2>&1
mergeMeshes final rotatingPart -overwrite > ../log.finalMesh-
mergeMeshes 2>&1
cd final
cd ../..
echo "Copying mesh into case directory..."
cp -rv mesh/final/constant/polyMesh constant > log.finalMesh-
cpMeshToCase 2>&1
```

## ANEXO IV.

### SCRIPT PARA CONFIGURAR LOS PATCHS ACMI

```
#!/bin/bash
#-----
#####*/\#
#||      =====|      Hydraulic Research      ||/\#
#|| /      \      E      |      GNU Toolbox      ||/\#
#|| || H.R ||      P      |      Version: 1.0      ||/\#
#|| \      /      N      |      Mail:stalyn.simbana@epn.edu.ec||/\#
#||      =====|      |      ||/\#
#####*/\#
#| File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022      |#
#|      www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122      |#
#\*-----*/#

cd ${0%/*} || exit 1
clear
foamVersion=" OpenFOAM-4.1 "
#echo " Caso anterior Borrado"
source .colors
#echo " Color de mi preambulo"
source .titles
echo "BY S.F.S.C"
# number of CPUs to run on
numProcs=12
#-----
echo -e " - Merge baffle + interface, and remove not necessary
boundaries"
cp system/createPatchDict.first system/createPatchDict
createPatch -overwrite >> logMeshing
#-----
echo -e " - Using interface patches to create faceSets and using the"
echo -e "the faceSets to create faceZones (correct orientation and
faces)"
echo -e "In addition we create the moving cellZone (for motion)"
topoSet >> logMeshing
#-----
echo -e " - Create ACMI interfaces using the faceZones"
rm -rf 0
createBaffles -overwrite >> logMeshing 2>&1

#-----
echo -e " - Remove zero-face entries in boundary file"
cp system/createPatchDict.second system/createPatchDict
createPatch -overwrite >> logMeshing
```

## ANEXO V.

### SCRIPTS PARA EJECUCIÓN DEL CASO.

```
#!/bin/bash
#-----
#####*/\#
#|||      =====          |      Hydraulic Research      |||\#
#|||      /          \      E      |      GNU Toolbox        |||\#
#|||      ||  H.R  ||  P      |      Version: 1.0            |||\#
#|||      \          /      N      |      Mail:stalyn.simbana@epn.edu.ec|||\#
#|||      =====          |          |          |||\#
#####*/\#
#|  File created by Hydraulic Research S.S., Fri Jun 24 2022      |#
#|          www.linkedin.com/in/stalyn-simbaña-898096122      |#
#\*-----*/#

cd ${0%/*} || exit 1
clear
foamVersion=" OpenFOAM-9.0 "
    #echo " Caso anterior Borrado"
source .colors
    #echo " Color de mi preambulo"
source .titles
    echo "BY S.F.S.C"

# number of CPUs to run on
numProcs=12
echo "Running Simulation..."
#-----
echo -e "      - Decompose the mesh again"
decomposePar >> log.decomposePar
#-----
echo -e "      - Modify boundaries for AMI /Polymesh/boundary "
#createPatch >> log.createPatch
#-----
echo -e "      - Initial Condition 0.orig"
ls -d processor* | xargs -I {} rm -rf ./{}/0
ls -d processor* | xargs -I {} cp -r 0.orig ./{}/0
#-----
echo -e "      - Renumber the mesh again"
mpirun -n 12 renumberMesh -overwrite -parallel >> log.renumberMesh
#-----
echo -e "      - Patch Summary "
patchSummary >> log.patchSummary
#-----
echo -e "      - Start simulation (this will need a long time)"
mpiexec -np 12 interFoam -parallel > log.simulation-interFoam 2>&1
#-----
echo -e "      - Reconstruct times steps (this will need a long time)"
reconstructPar > log.simulation-interFoam 2>&1
```

## ANEXO VI.

### SCRIPTS EN GNUPLOT RESIDUALES.

```
#!/bin/sh
# Stalyn Simbaña , 14 JUNIO 2022
cd ${0%/*} || exit 1 # Run from this directory
foamLog log.simulation-interFoam >/dev/null
gnuplot -persist > /dev/null 2>&1 << EOF
    set term svg dynamic size 566,374
    myOutput = "RESIDUAL_INICIAL.svg"
    set output myOutput
    set size 1,1
    set xtics font "Arial, 10"
    set ytics font "Arial, 10"
    set key font "Arial,10"
    set key top right
    set logscale y
    set xtics 0.005
    set mxtics 2
    set ytics 0.1
    set mytics 10
    set format y "1e{%L}"
    set title "RESIDUAL INICIAL"
    set ylabel "Residuales"
    set xlabel "Tiempo (s)"
    set grid
    plot "logs/k_0" title 'Res. Inicial K' w lp dt 1 lw 1 lt 1 pi
600 pt 2 ps 0.6 lc 1,\
        "logs/omega_0" title 'Res. Inicial omega' w lp dt 1 lw 1
lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 3,\
        "logs/p_rgh_3" title 'Res. Inicial p-rgh 3' w lp dt 1 lw
1 lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 5,\
        "logs/Ux_0" title 'Res. Inicial Ux' w lp dt 1 lw 1 lt 1
pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 10,\
        "logs/Uy_0" title 'Res. Inicial Uy' w lp dt 1 lw 1 lt 1
pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 11,\
        "logs/Uz_0" title 'Res. Inicial Uz' w lp dt 1 lw 1 lt 1
pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 12,\
EOF
#-----
```

## ANEXO VII.

### SCRIPTS EN GNUPLOT CONTINUIDAD

```
#!/bin/sh
# Stalyn Simbaña , 14 JUNIO 2022
cd ${0%/*} || exit 1 # Run from this directory
gnuplot -persist > /dev/null 2>&1 << EOF
    set term svg dynamic size 566,374
    myOutput = "CONTINUIDAD.svg"
    set output myOutput
    set size 1,1
    set xtics font "Arial, 10"
    set ytics font "Arial, 10"
    set key font "Arial,10"
    set key top right
    #set border 3
    set logscale y
    set yrange [ 5e-20:1e-6]
    set xtics 0.005
    set mxtics 2
    #set ytics 0.1
    set mytics 10
    set logscale y
    set format y "1e{%L}"
    set title "RESIDUAL DE CONTINUIDAD"
    set ylabel "CONTINUIDAD"
    set xlabel "Tiempo [s]"
    set grid

    plot "logs/contCumulative_1" title 'Cont Cumulative 1' w lp
dt 1 lw 1 lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 1,\
    "logs/contGlobal_1" title 'Cont Global 1' w lp dt 1 lw 1
lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 7,\
    "logs/contLocal_1" title 'Cont Local 1' w lp dt 1 lw 1
lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 6,\
EOF
#-----
```



## ANEXO VIII.

### SCRIPTS EN GNUPLOT NUMERO DE COURANT.

```
#!/bin/sh
# Stalyn Simbaña , 24 JUNIO 2022
cd ${0%/*} || exit 1 # Run from this directory
gnuplot -persist > /dev/null 2>&1 << EOF
  set term svg dynamic size 566,374
  myOutput = "COURANT.svg"
  set output myOutput
  set size 1,1
  set xtics font "Arial, 10"
  set ytics font "Arial, 10"
  set key font "Arial,10"
  set key bottom right
  #set border 3
  set logscale y
  set yrange [ 5e-7:1]
  set xtics 0.005
  set mxtics 2
  #set ytics 0.1
  set mytics 10
  set logscale y
  set format y "le{%L}"
  set title "NÚMERO DE COURANT"
  set ylabel "nCourant Co"
  set xlabel "Tiempo [s]"
  set grid
  plot "logs/CourantMax_1" title 'MaxnCo 1 (Zona Interfaz Agua-
Aire)' w lp dt 1 lw 1 lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 6,\
      "logs/CourantMean_1" title 'MeanCo 1 (Zona Interfaz Agua-
Aire)' w lp dt 1 lw 1 lt 1 pi 600 pt 2 ps 0.6 lc 7,\
EOF

#-----
```

## ANEXO IX.

### SCRIPTS EN PYTHON – INDEPENDENCIA DE MALLA- MOMENTO AMI Y ACMI

```
#!/usr/bin/python
# Comflics: Exploring OpenFOAM
# Compute forces coeffs
# Stalyn Simbaña , 24 JUNIO 2022
#%reset
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math as mt
# # Read Results
data1 = np.loadtxt('./M-AMI-1.75M/postProcessing/forcesA2/0/force-
ex.dat', skiprows=0)
data2 = np.loadtxt('./M-AMI-2.17M/postProcessing/forcesA2/0/force-
ex.dat', skiprows=0)
data3 = np.loadtxt('./M-AMI-2.77M/postProcessing/forcesA2/0/force-
ex.dat', skiprows=0)
data4 = np.loadtxt('./M-AMI-3.1M/postProcessing/forcesA2/0/force-
ex.dat', skiprows=0)
time1 = data1[:,0] # time
FPx1 = data1[:,1] # Force Pressure X
FPy1 = data1[:,2] # Force Pressure Y
FPz1 = data1[:,3] # Force Pressure Z
FVx1 = data1[:,4] # Force Viscous X
FVy1 = data1[:,5] # Force Viscous Y
FVz1 = data1[:,6] # Force Viscous Z
MPx1 = data1[:,7] # Moment Pressure X
MPy1 = data1[:,8] # Moment Pressure Y
MPz1 = data1[:,9] # Moment Pressure Z
MVx1 = data1[:,10] # Moment Viscous X
MVy1 = data1[:,11] # Moment Viscous Y
MVz1 = data1[:,12] # Moment Viscous Z
time2 = data2[:,0] # time
FPx2 = data2[:,1] # Force Pressure X
FPy2 = data2[:,2] # Force Pressure Y
FPz2 = data2[:,3] # Force Pressure Z
FVx2 = data2[:,4] # Force Viscous X
FVy2 = data2[:,5] # Force Viscous Y
FVz2 = data2[:,6] # Force Viscous Z
MPx2 = data2[:,7] # Moment Pressure X
MPy2 = data2[:,8] # Moment Pressure Y
MPz2 = data2[:,9] # Moment Pressure Z
MVx2 = data2[:,10] # Moment Viscous X
MVy2 = data2[:,11] # Moment Viscous Y
MVz2 = data2[:,12] # Moment Viscous Z
time3 = data3[:,0] # time
FPx3 = data3[:,1] # Force Pressure X
FPy3 = data3[:,2] # Force Pressure Y
FPz3 = data3[:,3] # Force Pressure Z
FVx3 = data3[:,4] # Force Viscous X
FVy3 = data3[:,5] # Force Viscous Y
FVz3 = data3[:,6] # Force Viscous Z
MPx3 = data3[:,7] # Moment Pressure X
MPy3 = data3[:,8] # Moment Pressure Y
```

```

MPz3      = data3[:,9] # Moment Pressure Z
MVx3      = data3[:,10] # Moment Viscous X
MVy3      = data3[:,11] # Moment Viscous Y
MVz3      = data3[:,12] # Moment Viscous Z
time4     = data4[:,0] # time
FPx4      = data4[:,1] # Force Pressure X
FPy4      = data4[:,2] # Force Pressure Y
FPz4      = data4[:,3] # Force Pressure Z
FVx4      = data4[:,4] # Force Viscous X
FVy4      = data4[:,5] # Force Viscous Y
FVz4      = data4[:,6] # Force Viscous Z
MPx4      = data4[:,7] # Moment Pressure X
MPy4      = data4[:,8] # Moment Pressure Y
MPz4      = data4[:,9] # Moment Pressure Z
MVx4      = data4[:,10] # Moment Viscous X
MVy4      = data4[:,11] # Moment Viscous Y
MVz4      = data4[:,12] # Moment Viscous Z

del data1
del data2
del data3
del data4

MPVx1= MPx1 + MVx1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy1= MPy1 + MVy1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz1= MPz1 + MVz1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M1= np.sqrt((MPVx1)**2+(MPVy1)**2+(MPVz1)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
M1=2*M1

MPVx2= MPx2 + MVx2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy2= MPy2 + MVy2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz2= MPz2 + MVz2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M2= np.sqrt((MPVx2)**2+(MPVy2)**2+(MPVz2)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
M2=2*M2

MPVx3= MPx3 + MVx3 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy3= MPy3 + MVy3 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz3= MPz3 + MVz3 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M3= np.sqrt((MPVx3)**2+(MPVy3)**2+(MPVz3)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
M3=2*M3

MPVx4= MPx4 + MVx4 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy4= MPy4 + MVy4 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz4= MPz4 + MVz4 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M4= np.sqrt((MPVx4)**2+(MPVy4)**2+(MPVz4)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
M4=2*M4
plt.plot(time,MP,color='b',linestyle='-',linewidth=0.5 ,marker='o',
markersize=0.1 , markerfacecolor='g', label="MP") # GRAFICO MOMENTO MP
plt.figure(figsize=(5.9, 3.9)) # 6,4
plt.plot(time1,M1,color='r',linestyle='-',linewidth=0.5 ,
markerfacecolor='k', label="MALLA-1.75M-A2") # GRAFICO MOMENTO MV
plt.plot(time2,M2,color='c',linestyle='-',linewidth=0.5 ,
markerfacecolor='y', label="MALLA-2.17M-A2") # GRAFICO MOMENTO M
plt.plot(time3,M3,color='b',linestyle='-',linewidth=0.5 ,
markerfacecolor='y', label="MALLA-2.77M-A2") # GRAFICO MOMENTO M

```

```

plt.plot(time4,M4,color='g',linestyle='-',linewidth=0.5 ,
markerfacecolor='y', label="MALLA-3.10M-A2") # GRAFICO MOMENTO M
max_value1 = max(M1)
print('Maximum value 1: ', max_value1)
maxindex1 = np.argmax(M1)
print('Index de Maximun Value 1: ',maxindex1)
max_value2 = max(M2)
print('Maximum value 2: ', max_value2)
maxindex2 = np.argmax(M2)
print('Index de Maximun Value 2: ',maxindex2)
max_value3 = max(M3)
print('Maximum value 3: ', max_value3)
maxindex3 = np.argmax(M3)
print('Index de Maximun Value 3: ',maxindex3)
max_value4 = max(M4)
print('Maximum value 4: ', max_value4)
maxindex4 = np.argmax(M4)
print('Index de Maximun Value 4: ',maxindex4)
PmaxX1=time1[maxindex1] # Valor de Momento Max
PmaxT1=M1[maxindex1] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 1: ',PmaxX1)
PmaxX2=time2[maxindex2] # Valor de Momento Max
PmaxT2=M2[maxindex2] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 2: ',PmaxX2)
PmaxX3=time3[maxindex3] # Valor de Momento Max
PmaxT3=M3[maxindex3] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 3: ',PmaxX3)
PmaxX4=time4[maxindex4] # Valor de Momento Max
PmaxT4=M4[maxindex4] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 4: ',PmaxX4)
plt.grid(True)
plt.grid(color = '0.5', linestyle = '--', linewidth = 0.5)
plt.axis('tight')
plt.xlabel('Tiempo [s]', fontsize=9)
plt.ylabel('Momento [Nm]', fontsize=9)
plt.title(' INDEPENDENCIA DE MALLA-AMI', fontsize=10)
plt.legend(loc="upper left", fontsize=7)
plt.xlim(0,0.03)
plt.ylim(0,16500)
plt.savefig('AMI.svg')
plt.show()

```

## ANEXO X.

### SCRIPTS EN PYTHON - COMPARACIÓN DEL MOMENTO AMI- ACMI

```
#!/usr/bin/python
# Comflics: Exploring OpenFOAM
# Compute forces coeffs
# Stalyn Simbaña , 14 JUNIO 2022

#%%reset
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math as mt

# # Read Results
data1 = np.loadtxt('./AMI-2/M-AMI-
2.77M/postProcessing/forcesA2/0/force-ex.dat', skiprows=0)
data2 = np.loadtxt('./ACMI/M-ACMI-2M/postProcessing/forcesA2/0/force-
ex.dat', skiprows=0)

time1 = data1[:,0] # time
FPx1 = data1[:,1] # Force Pressure X
FPy1 = data1[:,2] # Force Pressure Y
FPz1 = data1[:,3] # Force Pressure Z
FVx1 = data1[:,4] # Force Viscous X
FVy1 = data1[:,5] # Force Viscous Y
FVz1 = data1[:,6] # Force Viscous Z
MPx1 = data1[:,7] # Moment Pressure X
MPy1 = data1[:,8] # Moment Pressure Y
MPz1 = data1[:,9] # Moment Pressure Z
MVx1 = data1[:,10] # Moment Viscous X
MVy1 = data1[:,11] # Moment Viscous Y
MVz1 = data1[:,12] # Moment Viscous Z

time2 = data2[:,0] # time
FPx2 = data2[:,1] # Force Pressure X
FPy2 = data2[:,2] # Force Pressure Y
FPz2 = data2[:,3] # Force Pressure Z
FVx2 = data2[:,4] # Force Viscous X
FVy2 = data2[:,5] # Force Viscous Y
FVz2 = data2[:,6] # Force Viscous Z
MPx2 = data2[:,7] # Moment Pressure X
MPy2 = data2[:,8] # Moment Pressure Y
MPz2 = data2[:,9] # Moment Pressure Z
MVx2 = data2[:,10] # Moment Viscous X
MVy2 = data2[:,11] # Moment Viscous Y
MVz2 = data2[:,12] # Moment Viscous Z

del data1
del data2

MPVx1= MPx1 + MVx1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy1= MPy1 + MVy1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz1= MPz1 + MVz1 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M1= np.sqrt((MPVx1)**2+(MPVy1)**2+(MPVz1)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
```

```

M1=2*M1

MPVx2= MPx2 + MVx2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVy2= MPy2 + MVy2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
MPVz2= MPz2 + MVz2 # Modulo del Moment Pressure (X Y Z)
M2= np.sqrt((MPVx2)**2+(MPVy2)**2+(MPVz2)**2) # Modulo del Moment
Visoous (X Y Z)
M2=2*M2

#plt.plot(time,MP,color='b',linestyle='-',linewidth=0.5 ,marker='o',
markersize=0.1 , markerfacecolor='g', label="MP") # GRAFICO MOMENTO MP
plt.plot(time1,M1,color='r',linestyle='-',linewidth=1 ,
markerfacecolor='k', label="BUCKET-A2-AMI") # GRAFICO MOMENTO MV
plt.plot(time2,M2,color='c',linestyle='-',linewidth=1 ,
markerfacecolor='y', label="BUCKET-A2-ACMI") # GRAFICO MOMENTO M

max_value1 = max(M1)
print('Maximum value 1: ', max_value1)
maxindex1 = np.argmax(M1)
print('Index de Maximun Value 1: ',maxindex1)

max_value2 = max(M2)
print('Maximum value 2: ', max_value2)
maxindex2 = np.argmax(M2)
print('Index de Maximun Value 2: ',maxindex2)

PmaxX1=time1[maxindex1] # Valor de Momento Max
PmaxT1=M1[maxindex1] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 1: ',PmaxX1)

PmaxX2=time2[maxindex2] # Valor de Momento Max
PmaxT2=M2[maxindex2] # Valor del tiempo del Momento Max
print('TIME 2: ',PmaxX2)

plt.plot(PmaxX1,PmaxT1,color='black', linestyle='dashed', linewidth =
1, marker='s', markerfacecolor='black', markersize=3,label="P Moment
Max A2-AMI") #
plt.plot(PmaxX2,PmaxT2,color='blue', linestyle='dashed', linewidth =
1, marker='s', markerfacecolor='black', markersize=3,label="P Moment
Max A2-ACMI") #
plt.grid(True)
plt.grid(color = '0.5', linestyle = '--', linewidth = 0.5)
plt.axis('tight')
plt.xlabel('Tiempo [s]', fontsize=9)
plt.ylabel('Momento [Nm]', fontsize=9)
plt.title(' COMPARACIÓN DE MÉTODOS ACMI & AMI')
plt.legend(loc="upper left")
plt.xlim(0,0.03)
plt.ylim(0,16500)
plt.savefig('COMPA2.svg')
plt.show()

```

## ANEXO XI.

### DATOS EXPERIMENTALES - TURBINA PELTON - "ILLUCHI 2"

Para nuestro estudio se tomaron los valores para el punto de operación 5.

PUNTO_OPERACION	POTENCIA_CENTRAL	CAUDAL_TOTAL	POTENCIA EN EL EJE	CAUDAL_X_INYECTOR	TORQUE_X_INYECTOR	VELOCIDAD_ANGULAR	VELOCIDAD_JET	AREA_JET	DIAMETRO_JET
	[KW]	[m3/s]	[KW]	[m3/s]	[Nm]	[rad/s]	[m/s]	[m2]	[m]
1	854.297	0.376	904	0.188	5997.48	75.4	70.595	0.0026	0.058
2	1176.065	0.464	1226	0.232	8131.22	75.4	73.875	0.0031	0.063
3	1598.278	0.597	1648	0.298	10931.04	75.4	75.485	0.0039	0.07
4	1949.912	0.698	2000	0.349	13262.83	75.4	76.891	0.0045	0.076
<b>5</b>	<b>2467.622</b>	<b>0.878</b>	<b>2518</b>	<b>0.439</b>	<b>16695.92</b>	<b>75.4</b>	<b>76.916</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.085</b>

Fuente: (CENTRAL HIDROELECTRICA ILLUCHI- ELEPCO.SA)