



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES



**ESTUDIO MEDIANTE CFD DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN PARA LA TÉCNICA DE  
PULVERIZACIÓN TÉRMICA HVAF.**

**POR**

**Daniel Alberto Sáez Sepúlveda**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar  
al título profesional de Ingeniero Civil de Materiales.

Profesor Guía

Dr. Nicolas Araya Rivera

2024 Concepción

(Chile)

©2024 Daniel Alberto Sáez Sepúlveda.

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Resumen

El deterioro de las cucharas de turbina Pelton, debido a la velocidad del fluido y la presencia de sedimentos en el flujo de agua, representa un desafío significativo para la industria hidroeléctrica. Este fenómeno conduce a una pérdida de eficiencia en la generación de electricidad. Para mitigar este problema, la técnica de pulverización térmica HVAF (*High velocity air fuel*) ha ganado aceptación en aplicaciones de recubrimientos y reparación de superficies, destacando sus mejoras significativas en comparación con la técnica HVOF (*High velocity oxygen fuel*).

En este contexto, la simulación CFD (*Computational Fluid dynamics*) es esencial para predecir y entender el comportamiento del proceso de HVAF. Esta necesidad surge debido a la complejidad de los flujos y reacciones químicas involucradas, que son difíciles de medir experimentalmente con precisión. Se presenta un modelo de simulación CFD utilizando el software ANSYS FLUENT STUDENT 2024 R1, aplicado a la pistola de pulverización térmica fabricada por KERMETICO y modelo AcuKote07 (AK07), alimentada con propano. Este modelo emplea el método de combustión de uno y dos pasos para las reacciones químicas tanto en el flujo interno de la pistola como en el externo, permitiendo un análisis más detallado de las interacciones fisicoquímicas en el proceso.

Los resultados de este estudio, que muestran temperaturas de 1800K y 1900K para los métodos de un paso y dos pasos respectivamente, están en consonancia con los datos de la literatura. La uniformidad en el aumento de temperatura y el efecto Venturi observado en el diseño de la pistola destacan su eficiencia, adaptado para optimizar el sistema HVAF.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más profunda gratitud a mis padres, Gloria y Alfredo, y a mi hermano, Alfredo, por su incondicional apoyo y por nunca dejar de creer en mí. Estoy sumamente agradecido de tenerlos en mi vida y de haber aprendido de ellos a superar las adversidades con determinación y amor. Un especial agradecimiento a mi hermano de otra madre y de la vida, Nicolás, por demostrarme que una amistad verdadera puede brindar apoyo y comprensión inquebrantables, siendo una fuente de fuerza y motivación constantes.

En especial, quiero agradecer a mi abuela Violeta y mi querida perrita Sica, quienes, sin estar físicamente con nosotros, siguen ofreciéndome su compañía y enseñándome a ver la vida con simplicidad y amor.

A mi amigo Patricio, quien la vida arrebató demasiado pronto: desearía que pudieras estar aquí para ver el fruto de lo que tanto luchamos. Te recuerdo en cada logro y en cada desafío.

Extiendo mi gratitud a mi primo Matías, mi tío Manolo y tía Gabi, mi prima Paola y su familia, así como a nuestros amigos de la familia, por su apoyo, motivación y cariño durante este proceso, brindado no solo a mí sino también a mi familia.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos de la infancia, del colegio y de la universidad, quienes han sido una fuente constante de risas y luz, especialmente en los momentos más oscuros. Sin su presencia y apoyo, no sería la persona que soy hoy. Cada uno de ellos ha jugado un papel crucial en mi vida. Su amistad ha sido un regalo invaluable, enseñándome el verdadero significado de amor y comprensión.

Finalmente, un sincero agradecimiento a mi profesor guía, Nicolás Araya, por su apoyo constante y sus valiosos consejos. Valoro profundamente su orientación y dedicación que me brindó a lo largo de este proceso.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	HIPÓTESIS .....	5
3.	OBJETIVOS .....	6
3.1	Objetivo general.....	6
3.2	Objetivos específicos .....	6
4.	ESTADO DEL ARTE .....	7
4.1	Pulverización Térmica .....	7
4.1.1	Sustrato.....	9
4.1.2	Materiales de recubrimiento para pulverización térmica.....	9
4.2	Técnica HVOF .....	10
4.2.1	Polvos cermet WC-Co-Cr.....	14
4.2.2	Caracterización recubrimientos.....	19
4.3	Daños en cucharas de turbina Pelton .....	22
4.3.1	Mecanismos de daño .....	24
4.4	Simulación dinámica de fluidos computacional.....	28
4.4.1	Modelos matemáticos.....	29
4.4.2	Simulación en técnica pulverización térmica HVOF .....	36
5.	Metodología.....	49
5.1	Esquematación de la pistola .....	50
5.2	Mallado .....	52
5.3	Modelos matemáticos .....	55
5.3.1	Modelo de energía.....	55
5.3.2	Modelo de turbulencia.....	56
5.3.3	Modelo de combustión .....	58
6.	Resultados y discusiones .....	59
6.1	Reacción química método de un paso .....	60
6.2	Reacción química método de dos pasos .....	66
7.	Conclusiones .....	73
8.	Referencias.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquematación de la pulverización térmica .....	7
<b>Figura 2.</b> Clasificación de los procesos pulverización térmica .....	8
<b>Figura 3.</b> Diagrama de flujo de pulverización térmica .....	10
<b>Figura 4.</b> Pistola de rociado térmico HVAF AK07 de KERMETICO .....	11
<b>Figura 5.</b> Esquematación de pistola de rociado térmico AK07 de KERMETICO .....	12
<b>Figura 8.</b> Ilustración de la formación de las microestructuras de WC-10Co-4Cr rociados por HVOF .....	21
<b>Figura 9.</b> Componentes principales de una turbina .....	22
<b>Figura 10.</b> Diseño cuchara de turbina Pelton (a) vista superior, (b) corte transversal y (c) triangulo de velocidad .....	24
<b>Figura 11.</b> Cucharas de turbina Pelton dañadas por erosión e hidroabrasión. ....	25
<b>Figura 12.</b> Diagrama de flujo de activación de los mecanismos de daño .....	27
<b>Figura 13.</b> Esquematación pistola HVAF enfriada por agua del modelo de Yuan et al. ....	37
<b>Figura 14.</b> Distribución interna de vectores de velocidad (a) y temperatura (b) en la pistola de pulverización .....	38
<b>Figura 15.</b> Velocidades (a) y temperatura (b) de los distintos flujos según el método de reacción química empleado .....	39
<b>Figura 16.</b> Esquematación pistola AK07, destacando las partes que se varían en los distintos casos .....	40
<b>Figura 18.</b> Distribución de la temperatura (a) y velocidad (b) con la variación de longitud de la boquilla[33]. ....	42
<b>Figura 19.</b> (a) velocidad y (b) temperatura de diferentes factores de forma de partículas .....	43
<b>Figura 20.</b> Perfiles de vuelos de las partículas a diferentes tasas de flujos de nitrógeno .....	44
<b>Figura 21.</b> Presión del gas para diferentes configuraciones de la boquilla .....	45
<b>Figura 22.</b> Velocidad del gas para diferentes configuraciones de la pistola .....	46
<b>Figura 23.</b> Proceso de mezcla de propano y aire en la cámara de mezcla .....	47
<b>Figura 24.</b> Comparación de la temperatura y velocidad del flujo de gas para diferentes mezclas .....	48
<b>Figura 25.</b> Comparación del vuelo de las partículas de diferentes tamaños en la mezcla II.....	49
<b>Figura 27.</b> FaceSplit pistola HVAF KERMETICO AK07. ....	52
<b>Figura 28.</b> Gráfico de convergencia: método de un paso (a) y método de dos pasos (b). ....	54
<b>Figura 30.</b> Contorno (a) y variación (b) de la velocidad del flujo de combustión en pistola HVAF en el método de un paso. ....	62

<b>Figura 31.</b> Contorno (a) y variación (b) de temperatura en pistola HVAF en el método de un paso .....	63
<b>Figura 32.</b> Contorno (a) y variación (b) de presión en pistola HVAF en el método de un paso. 65	65
<b>Figura 33.</b> Variación de la fracción molar de propano (a), nitrógeno (b) y dióxido de carbono (c) a lo largo del dominio de la pistola HVAF en el método de un paso.....	66
<b>Figura 34.</b> Contorno (a) y variación (b) de velocidad en pistola HVAF en el método de dos pasos.....	67
<b>Figura 35.</b> Contorno (a) y variación (b) de velocidad en pistola HVAF en el método de dos pasos.....	69
<b>Figura 36.</b> Contorno (a) y variación (b) de presión en pistola HVAF en el método de dos pasos. ....	71
<b>Figura 37.</b> Variación de la fracción molar de propano (a), nitrógeno (b) y dióxido de carbono (c) a lo largo del dominio de la pistola HVAF en el método de dos pasos.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Características de los parámetros del proceso en los daños de la cuchara .....	26
<b>Tabla 2</b>	Casos de estudio para análisis de sensibilidad.....	53
<b>Tabla 3</b>	Valores de los parámetros del modelo de turbulencia RNG k-epsilon .....	57
<b>Tabla 4</b>	Flujos masicos de entrada para cada tipo de reacción química .....	59
<b>Tabla 5</b>	Temperaturas del flujo de gas obtenidas de la literatura .....	60

## **NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES**

HVOF: High Velocity Oxygen-Fuel

HVAF: High Velocity Air-Fuel

LTHVAF: Low Temperature High Velocity Air-Fuel

CFD: Computational Fluids Dynamics

Cermet: Material cerámico-metálico

SPS: Spark Plasma Sintering

SHIP: Sintering Hot Isostatic Pressing

CTC: Carburo de tungsteno cementado

APT: Ammonium Paratungstate

WC: Carburo de tungsteno

WC-Co-Cr: Carburo tungsteno, cobalto y cromo

W<sub>2</sub>C: Dicarburo de tungsteno

K: Grados kelvin

m/s: Metros por segundos

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de las pulverizaciones térmicas para protección contra desgaste y corrosión, la técnica HVAF (*High velocity air fuel*) ha cobrado relevancia últimamente por su capacidad para crear recubrimientos de alta calidad y bajos costos operacionales. Desarrollada a partir de la técnica HVOF (*High velocity oxygen fuel*), la HVAF utiliza una pistola de rociado térmica que mezcla aire y combustible a alta presión, generando un chorro de alta velocidad que deposita partículas de recubrimiento sobre la superficie. Al impactar, estas partículas forman un revestimiento denso y fuertemente adherido [1], [2].

La versatilidad de técnica HVAF la ha convertido en una opción atractiva para diversas industrias, incluyendo la petroquímica, aeroespacial, energética, siderúrgica, y también en campos médicos y biomédicos [1], [2]. Su uso se extiende a la protección preventiva y reparación de componentes críticos en estas áreas, siendo de particular interés para las plantas hidroeléctricas [3], [4].

Particularmente en la industria hidroeléctrica, la eficiencia puede verse afectada por diversos mecanismos de daños que impactan en el rendimiento y la vida útil de los equipos. La energía hidroeléctrica representa un 71% del total de energía renovable a nivel mundial y utilizada comúnmente en países con geografía montañosas, aprovecha la energía potencial del agua generada por la diferencia de altura hasta su descarga, basándose en el principio de conservación de energía. En este sentido, Chile se presenta como un escenario idóneo para su utilización. En Chile, la energía hidroeléctrica ha

representado en promedio un 38.95% de la generación eléctrica total del país desde su implementación, posicionándose como la principal fuente de energía renovable del país [5].

En general, la industria hidroeléctrica utiliza la turbina Pelton para la generación de energía. Esta turbina está compuesta por diferentes piezas, siendo una de las más importantes las cucharas, que reciben el chorro de agua a alta velocidad. Sin embargo, este impacto genera diversos problemas, como el arrancamiento repentino de material, la generación de surcos y fatiga superficial, debido a la presencia de sedimentos en el agua y a la alta velocidad y forma cíclica del impacto del fluido [6], [7], [8]. El principal efecto se traduce en la alteración de la geometría de las cucharas, ocasionando pérdidas económicas para la industria tanto en los costos de mantención como en la disminución de la eficiencia del proceso.

La principal tarea consiste en reparar las cucharas de la turbina para restaurar su geometría mediante la técnica HVAF, utilizando polvos de carburo de tungsteno. Esta elección se basa en las excelentes propiedades tribológicas de estos recubrimientos, lo que los ha convertido en una solución ampliamente reconocida y establecida en el ámbito industrial, previamente validados en la técnica HVOF [4], [9] [10]. Este recubrimiento generado por la técnica HVAF presenta notables mejoras, principalmente debido a la reducción de la oxidación en comparación con la técnica HVOF. Esto se debe a la menor concentración de oxígeno en el proceso. Además, observando mejoras en la temperatura de la llama, y

la velocidad de impacto de las partículas, resultando en una mejor calidad de recubrimiento [11], [12].

La simulación computacional es una herramienta valiosa para estudiar este tipo de técnicas, al ofrecer un análisis detallado de procesos complejos. Esto la posiciona como un recurso invaluable en la investigación y desarrollo de este campo. En este contexto, diferentes investigaciones han empleado el uso de simulaciones para obtener una comprensión y optimización de la técnica HVOF. Ejemplos destacados es el trabajo de Pan et al.[13], quienes investigaron la conducta de la llama y las partículas del proceso, concluyendo con recomendaciones específicas sobre el tamaño óptimo de partículas y velocidad de la inyección ideal. Por otra parte, Jadidi et al.[14] centró sus estudios en la influencia de la forma y ubicación de los sustratos en la pulverización, identificando un impacto significativo en la conducta de las partículas y la calidad de los recubrimientos.

No obstante, el análisis mediante simulaciones en HVAF son aún limitadas, dado que esta técnica es relativamente nueva en estudios. Debido a que la técnica HVAF deriva del HVOF, la base de datos de simulaciones desarrolladas de este último nos puede proporcionar un punto de partida útil para la simulación de HVAF. En este panorama, es fundamental explorar las investigaciones relevantes sobre de la técnica. Yuan et al. [15], por ejemplo, determinaron rangos apropiados de parámetros (flujo de inyección, temperatura y velocidad) y analizaron el comportamiento de las partículas metálicas para optimizar el proceso. Por otro lado, Jiang et al.[16], utilizando partículas en base de hierro en un modelo computacional, valida la relación directa entre el flujo de gas, el tamaño y

la forma de las partículas, así como la posición de inyección, con la calidad del recubrimiento como se había investigado para HVOF, pero ahora para HVAF. En estudios en 3D [17], se detalla que la utilización de una malla hexaédrica proporciona mayor precisión en el análisis del flujo supersónico y se comprueba el efecto de rectificación de la lámina cerámica porosa de la pistola para el gas en la cámara de combustión.

En la actualidad, en el proceso HVAF, la comprensión de cómo los parámetros operativos como la presión del combustible y del aire, el flujo de polvos y el flujo de gas inerte influyen en la velocidad de la llama, la temperatura y los esfuerzos residuales en los recubrimientos aun no es completa. Es crucial destacar que la selección y ajuste cuidadoso de estos parámetros son esenciales para optimizar la calidad del recubrimiento y minimizar los costos operativos. Controlar adecuadamente estos factores es fundamental para maximizar la eficiencia del proceso y garantizar la integridad y durabilidad de los recubrimientos producidos mediante HVAF.

En virtud de estos desafíos, este trabajo de título ha desarrollado un modelo de combustión en simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics*) en ANSYS MULTIPHYSICS FLUENT 2024 R1, específicamente para HVAF utilizando la pistola KERMETICO AcuKote07 (AK07). Este modelo incluye una figura optimizada de la geometría de la pistola, facilitando análisis más precisos y profundos con un costo computacional bajo.

## **2. HIPÓTESIS**

La simulación CFD realizada en el software ANSYS FLUENT STUDENT R1, utilizando el modelo de pistola KERMETICO AK07, permitirá obtener datos del flujo de llama que concuerdan con la información disponible en la literatura científica existente.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Estudiar el flujo de gas de una pistola HVAF KERMETICO AK07 alimentada por propano utilizando un escenario de simulación CFD en ANSYS FLUENT STUDENT R. El análisis se llevará a cabo mediante el modelo de uno y dos pasos para el sistema de combustión, con el objetivo de comparar los resultados con los datos disponibles en literatura.

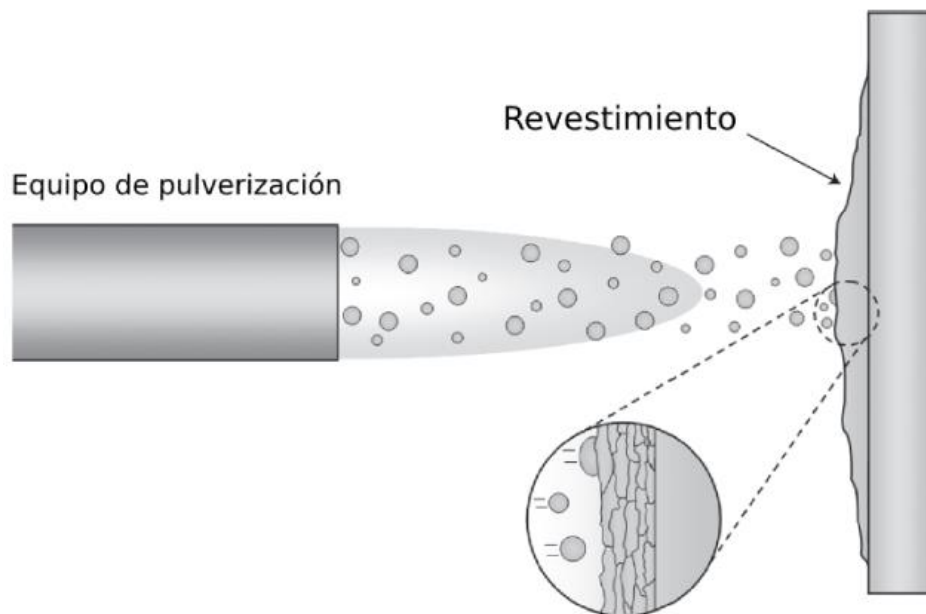
#### **3.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un dominio de simulación que refleje con precisión la geometría de la pistola KERMETICO AK07, incluyendo su flujo de llama y las condiciones de contorno relevantes para el proceso.
- Analizar las diferencias en el flujo de llama mediante los métodos de uno y dos pasos de la reacción química en el modelo de combustión.
- Validar el escenario de simulación comparando los resultados obtenidos con mediciones y datos de referencia encontrados en la literatura.

## 4. ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Pulverización Térmica

La pulverización térmica es un proceso ampliamente utilizado en la industria para la aplicación de revestimientos, ya sean metálicos o no metálicos [18]. Su objetivo es calentar la materia prima seleccionada hasta un estado fundido o semi-fundido utilizando una fuente de energía. Posteriormente, las partículas calentadas son aceleradas y proyectadas mediante gases de procesos o chorros de atomización sobre una superficie de destino con el fin de formar el revestimiento, tal como describe J.R. Davis [19]. Al impactar, las partículas se adhieren a la superficie, generando una acumulación progresiva de espesor y conformando así el revestimiento deseado. Esta técnica se ilustra en la figura 1:



**Figura 1.** Esquematación de la pulverización térmica[20].

Además de la diversidad de aplicaciones y técnicas, la clasificación de los procesos de pulverización térmica comúnmente se basa en el tipo de fuente de energía utilizada para fundir el material de recubrimiento. Como se presenta en la figura 2, estas fuentes de energía se dividen en cinco categorías principales: líquidos fundidos, combustión de gases, descarga eléctrica, energía cinética y de fotones. También existen otros criterios para categorizar este proceso, como el diseño de la pistola de pulverización, tipo de combustible utilizado, la atmosfera de deposición (que puede ser gas inerte, atmosférica, de baja o alta presión, etc.), y el tipo de material de recubrimiento [1], [18].

Cada categoría de fuente de energía presenta una diversidad de subcategorías, cada una enfocada en áreas específicas. Esto demuestra la amplitud y complejidad del campo de la pulverización térmica, una materia que está en constante crecimiento y evolución, ajustándose y expandiéndose para satisfacer las demandas y necesidades de la industria[19], [21], [22].

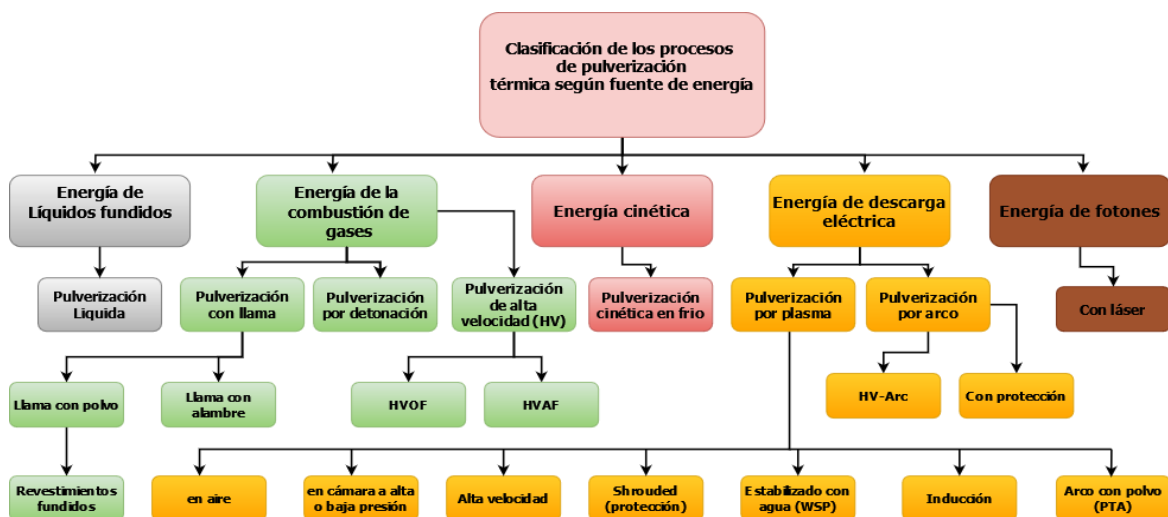


Figura 2. Clasificación de los procesos pulverización térmica [18].

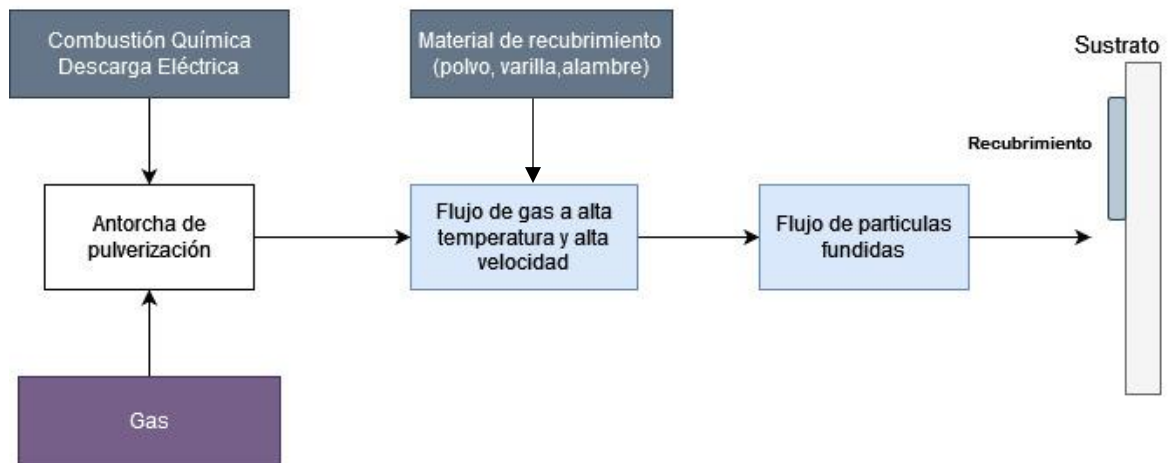
### **4.1.1 Sustrato**

En el contexto de pulverización térmica, el término “sustrato” se refiere a la superficie o material al que se aplica el recubrimiento. El sustrato sirve como base para recibir el material de recubrimiento, y puede ser metálico, cerámico, compuesto, vidrio, madera, etc. Dado que cada material tiene un punto de fusión específico y tasas de oxidación diferente, es crucial manejar adecuadamente la temperatura de sustrato durante el proceso para prevenir cualquier daño o cambio no deseado [18]. Esto garantizará la correcta adhesión del recubrimiento y preservará las propiedades físicas del sustrato [23]. Además, cada técnica requiere una preparación específica del sustrato, adaptada a sus características y necesidades.

### **4.1.2 Materiales de recubrimiento para pulverización térmica**

La selección de materiales para la pulverización térmica es fundamental, ya que actúan como la base para el proceso de revestimiento. Los tipos más comunes son polvos, alambres y varillas, aunque también se utilizan cordones y líquidos como suspensiones o soluciones. La aplicación de estos materiales está en constante investigación y desarrollo en los últimos años [18], [23], [24]. La elección entre estas opciones depende del equipo de pulverización y de las especificaciones requeridas para el revestimiento. Por ejemplo: Song y Li [25] aplicaron la técnica de pulverización por plasma utilizando alambre para mejorar la adhesión entre los recubrimientos y sustratos. Kurako et al. [26] estudiaron recubrimientos generados a partir de varillas de acero mediante la técnica de pulverización por haz de iones, mientras que Sadeghimeresht et al. [27] compararon la resistencia a la corrosión de recubrimiento en base hierro y cobalto generados con la técnica HVAF.

Adicionalmente, el diagrama de flujo en la figura 3 ilustra el proceso de pulverización térmica utilizando gas. En este proceso, la combinación gas y fuente de energía produce la energía necesaria para generar la antorcha de pulverización. El calor generado por la antorcha funde el material de recubrimiento, que es luego proyectado hacia el sustrato en forma de un chorro de partículas fundidas generando el revestimiento final.



**Figura 3.** Diagrama de flujo de pulverización térmica [28].

## 4.2 Técnica HVAF

Desarrollado sobre la base de la técnica HVOF, la técnica HVAF se presenta como una versión mejorada con una mayor tasa de deposición, menores temperaturas de las partículas en vuelo, reducción del contenido de óxido y mayor densidad de recubrimiento. Este avance se logra gracias a la utilización de aire comprimido en lugar de oxígeno. Los recubrimientos generados por la técnica HVAF, comparados con los depositados mediante HVOF, han demostrado claras ventajas en términos de protección contra el desgaste y rentabilidad [29], [30].

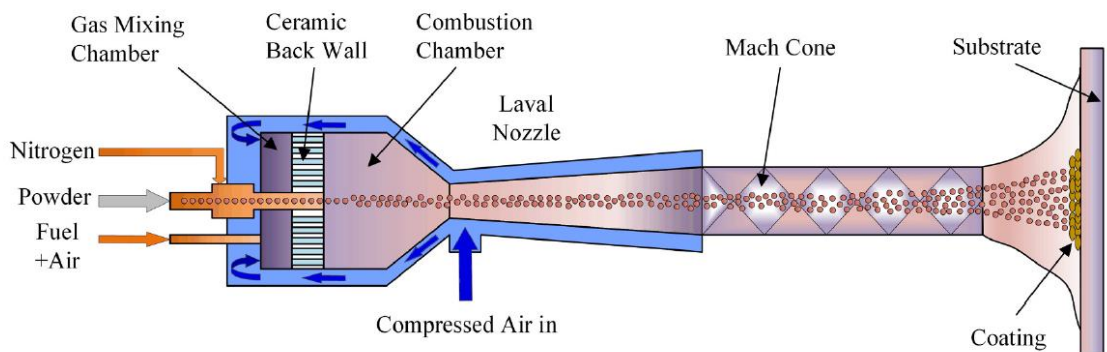
El HVOF emplea una combinación de aire comprimido y combustible para generar un chorro de alta velocidad que los 1400 m/s, acelerando las partículas a velocidades de 1100-1200 m/s. Este proceso permite la formación de recubrimientos densos y con baja porosidad. Además, la temperatura de llama se mantiene por debajo de los 2200K, unos 1000K menos que en el proceso HVOF, calentando las partículas hasta aproximadamente 1900-2000K. Un control adecuado de la temperatura y velocidad en vuelo de las partículas favorecerá una deposición efectiva. Se ha observado que temperaturas más altas, como las del proceso HVOF (3000K), pueden provocar un mayor grado de descarburización del polvo, resultando en la formación de fases frágiles como W<sub>2</sub>C (dicarburo de tungsteno) en el recubrimiento, lo que aumenta su fragilidad y resistencia a la erosión [27], [31].



**Figura 4.** Pistola de rociado térmico HVOF AK07 de KERMETICO [32].

La pistola de pulverización AK07 de KERMETICO, esquematizada en la figura 6, utiliza aire comprimido tanto como refrigerante como gas de soporte de combustión. En su funcionamiento, el combustible (propano) y el aire comprimido se mezclan completamente en la cámara de premezcla de gas (*gas mix chamber*). Esta mezcla ingresa a la cámara de combustión (*combustión chamber*) a través de la placa cerámica porosa y

es iniciada por ignición, generando un flujo de llama de alta temperatura y presión característico de esta técnica. Este flujo es acelerado hasta velocidades supersónicas a través de la boquilla Laval (*laval nozzle*). Un gas portador inyecta los polvos en la cámara de combustión, donde el polvo es calentado a un estado fundido o semi fundido por el flujo de llama y luego pulverizado para formar el recubrimiento. El diseño de esta pistola también logra un efecto de enfriamiento, ya que se inyecta aire comprimido (*compressed air in*) a través de una entrada ubicada en la boquilla [33].



**Figura 5.** Esquematzación de pistola de rociado térmico AK07 de KERMETICO [33].

Una de las piezas fundamentales de la pistola es la boquilla Laval, una boquilla que consta de una sección convergente y sección divergente. Su función es acelerar el flujo de gas a velocidades supersónicas y luego expandirlo rápidamente a través de la sección divergente. La longitud de esta pieza puede afectar significativamente la eficiencia de deposición, microestructura y propiedades de los recubrimientos. Está directamente relacionada con la formación de los conos de Mach que hace referencia a la velocidad supersónica del flujo a través de la boquilla. Además, la boquilla controla la velocidad y temperatura de las partículas de la siguiente manera [16], [33] :

- **Aceleración de partículas:** en la sección convergente, las partículas son comprimidas y aceleradas, aumentando su velocidad. La sección divergente aumenta esta aceleración, permitiendo que las partículas alcancen velocidades supersónicas.
- **Control de temperatura:** durante la transición de la sección convergente a la divergente, la temperatura del gas y las partículas se ajusta por la compresión y posterior expansión, optimizando el estado térmico de las partículas para mejorar la adhesión al sustrato.
- **Estabilidad del flujo:** la longitud óptima de la boquilla facilita un flujo más controlado y uniforme. Esto ayuda a minimizar la turbulencia dentro de la boquilla, lo que es crucial para mantener un patrón de rociado coherente y homogéneo, optimizando así la calidad del recubrimiento aplicado.

De la misma forma, en técnicas de pulverización térmica como el HVAF, la utilización de gases desempeña roles claves que incluyen:

- **Aceleración y transporte del material:** los gases como el aire comprimido, argón o nitrógeno participan en el transporte y aceleración de las partículas de recubrimiento hacia la superficie deseada.
- **Gases como combustible:** en técnicas como HVOF y HVAF, los gases (generalmente oxígeno o aire) se mezclan con un combustible (como propano, keroseno, gas natural) que contribuye en el proceso de combustión que genera la llama o el chorro a alta velocidad.

- **Atmosfera protectora:** gases inertes se utilizan para establecer una atmosfera protectora que previene la oxidación del material de recubrimiento.

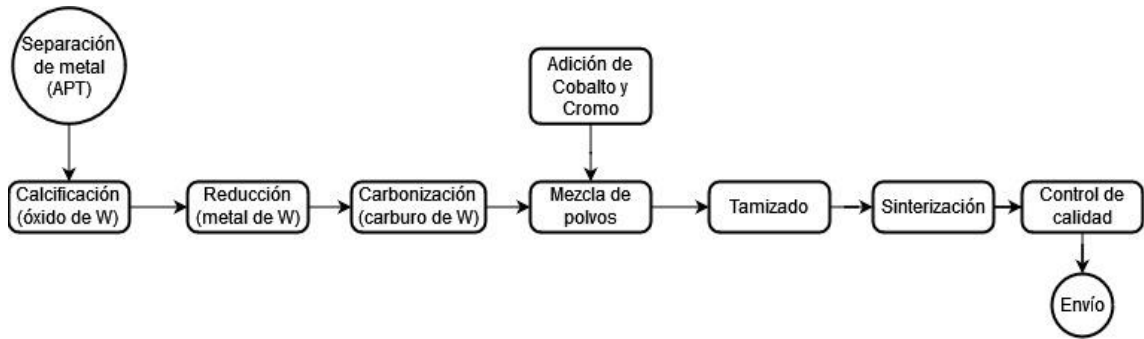
El proceso de pulverización térmica HVAF es extremadamente complejo desde un punto de vista de la dinámica de fluidos. Este proceso incluye combustión, flujos turbulentos, flujos compresibles, transferencia de calor y transiciones subsónicas a supersónicas.

#### **4.2.1 Polvos cermet WC-Co-Cr**

La fabricación de polvos cermet se lleva a cabo generalmente mediante la metalurgia de polvos, un proceso que implica la creación de materiales a partir de polvos finos. Entre los métodos que se han estudiado, podemos encontrar el moldeo por inyección [34] y la sinterización al vacío a 1700K [35]. Además, se han utilizado tecnologías más avanzadas como la sinterización por plasma de chispa (SPS) y la sinterización a alta presión e isotérmica (SHIP) [36], [37].

Como se detalla en la figura 6, el proceso específico de fabricación del polvo cermet WC comienza con la separación de desechos que contienen tungsteno para formar cristales de paratungstato de amonio (APT), los cuales son calcinados para formar óxido de tungsteno. Posteriormente, este óxido se reduce a polvo de metal de tungsteno, que luego es mezclado con polvo recuperado de desechos, binder de cobalto y aditivos de acuerdo con las especificaciones del cliente. Tras el tamizado, los polvos son sometidos a sinterización para formar al carburo de tungsteno cementado (CTC). Finalmente, los productos son sometidos a pruebas de calidad, incluyendo pruebas de morfología esférica que

garantizarán una excelente fluidez del polvo desde el alimentador hasta la pistola de rociado [18].



**Figura 6.** Proceso de fabricación de carburo cementado de tungsteno.

Una vez garantizada la calidad del polvo, es crucial considerar el tamaño de las partículas para su aplicación práctica. Para la técnica de pulverización térmica HVAF, el tamaño nominal (estándar) de partícula de polvo WC-Co-Cr en la industria se encuentra en el rango de 5-45  $\mu\text{m}$  [12], [38]. Este polvo también se puede clasificar en diferentes categorías según su tamaño: el polvo fino abarca desde 5 hasta 15  $\mu\text{m}$ , el polvo medio con un rango de 15-30  $\mu\text{m}$ , y el polvo grueso que va de 30-45  $\mu\text{m}$  [39]. Además, es importante destacar que esta información concuerda con los rangos de tamaño de partícula recomendados por el fabricante KERMETICO para su AK07, lo que subraya la relevancia y la validez de estos parámetros [32].

Comprender cómo el tamaño de las partículas influye en su comportamiento durante el rociado es clave para optimizar el proceso. Este entendimiento lleva a la identificación de un rango óptimo de tamaño, como se detalla a continuación. Según estudios de Pan et al.[13], las partículas de WC-Co más pequeñas (5-10 $\mu\text{m}$ ) en el proceso HVOF muestra deficiencias ya que son más susceptibles al flujo de la llama y tienden a ser arrastradas

fuera de la trayectoria principal hacia el sustrato. Con el aumento del tamaño de las partículas en el rango (15-40  $\mu\text{m}$ ), también aumenta su inercia, lo que dificulta su desviación de la trayectoria hacia el sustrato, además de mantenerlas en un estado semisólido, lo cual es beneficioso para su efectividad en el proceso. En contraste, las partículas más grandes ( $\geq 50\mu\text{m}$ ) nunca alcanzan el estado líquido antes de llegar al sustrato. Así, el rango óptimo de tamaño de partículas se sitúa entre 20-40  $\mu\text{m}$ , donde la mayoría de las partículas se encuentran en un estado semi-fundido antes de impactar en el sustrato y se mantienen en el centro de la línea objetivo de la pistola.

Además de las observaciones de Pan et al., los estudios realizados por Li et al. [40] para HVOF proporcionan evidencia adicional sobre el comportamiento de las partículas en distintos tamaños, reforzando la comprensión de cómo se puede lograr la eficacia máxima en la pulverización térmica. Según este estudio, las partículas pequeñas ( $\approx 5\mu\text{m}$ ) de WC-12C se funden antes de abandonar de la pistola y luego se solidifican durante el vuelo. Además, las partículas en el rango de tamaño 10-30 $\mu\text{m}$  mantienen su velocidad debido a su menor momentum e inercia. Resulta interesante que cuando la velocidad de una partícula supera la velocidad de la llama, la fuerza de arrastre que actúa sobre estas cambia de dirección, actuando como una resistencia que reduce la velocidad de la partícula. Este estudio confirma que el rango óptimo de tamaño de partícula para obtener un recubrimiento de alta calidad es de 10-30 $\mu\text{m}$ .

Si bien los dos estudios anteriores se centran en el proceso HVOF, existen diferencias significativas entre ellos. El estudio de Pan et al. se enfoca en partículas de WC-Co,

mientras que el de Li et al. analiza WC-12C. La variación en la composición química afecta como las partículas interactúan con la llama del proceso HVOF y con el sustrato. Las diferencias en los rangos del tamaño de partículas propuestos por ambos estudios presentan como factores como la composición química, las propiedades físicas, el estado de fusión, las condiciones del proceso y las metodologías experimentales pueden influir en el comportamiento de las partículas en el proceso HVOF. Las perspectivas de ambos estudios son valiosas y contribuyen a una comprensión más completa de este proceso, ayudando a identificar los rangos óptimos de tamaño de partículas para diferentes materiales y condiciones.

Adicionalmente, estudios realizados mediante la técnica HVAF, como el de Xiao et al.[41], corroboran y complementan las investigaciones relacionadas con el proceso HVOF, sugiriendo que, aunque los procesos son diferentes, los hallazgos en HVOF pueden servir como una base sólida para iniciar estudios en HVAF. En el estudio de Xiao et al., se observó que el tamaño de partícula tiene un impacto significativo en las propiedades del recubrimiento. Según sus resultados, el rango óptimo de tamaño de partícula es de 12-49 $\mu\text{m}$ , lo que resulta en recubrimientos más densos y uniformes. Este tamaño de partícula favorece la adhesión, mientras que las partículas más pequeñas experimentan adhesión-pulverización y las partículas más grandes sufren rebote-abrasión al impactar contra el sustrato.

Además del tamaño de las partículas, Varis et al. [42] destacan otros aspectos fundamentales que desempeñan un papel crucial en la calidad del recubrimiento, tales como la

distribución y densidad del polvo. Según Torkaashvand et al [39], el tamaño de las partículas factor determinante en el comportamiento de aplanamiento, que describe como las partículas cambian de forma al impactar contra la superficie objetivo durante el proceso de recubrimiento. Además, la porosidad del polvo también es un aspecto relevante, ya que la dureza del polvo disminuye su aumento, afectando la capacidad de deformación al impactar[43].

Complementando la importancia del tamaño de partículas, la velocidad crítica se presenta como otro determinante crucial en la calidad final del recubrimiento. Esta velocidad es la que permite la unión metalúrgica entre la partícula y el sustrato, con un rango óptimo de velocidad crítica es de 300-1200 m/s. Si la velocidad está por debajo de este rango, las partículas no tienen suficiente energía cinética para adherirse al sustrato, lo que genera mala adhesión. Por otro lado, una velocidad superior al rango óptimo puede hacer que las partículas se fragmenten al impactar en el sustrato, resultando en defectos en el recubrimiento. Ambos casos pueden deteriorar la calidad del recubrimiento, por lo que es crucial controlar esta variable. Una forma de ajustar la velocidad crítica es precalentando las partículas antes de su inyectarlas en la pistola, optimizando el proceso. Además, existen varios parámetros de pulverización que pueden influir en la velocidad crítica, como la densidad del material, la forma y tamaño de las partículas, el punto de fusión y la velocidad o temperatura de impacto inicial [44].

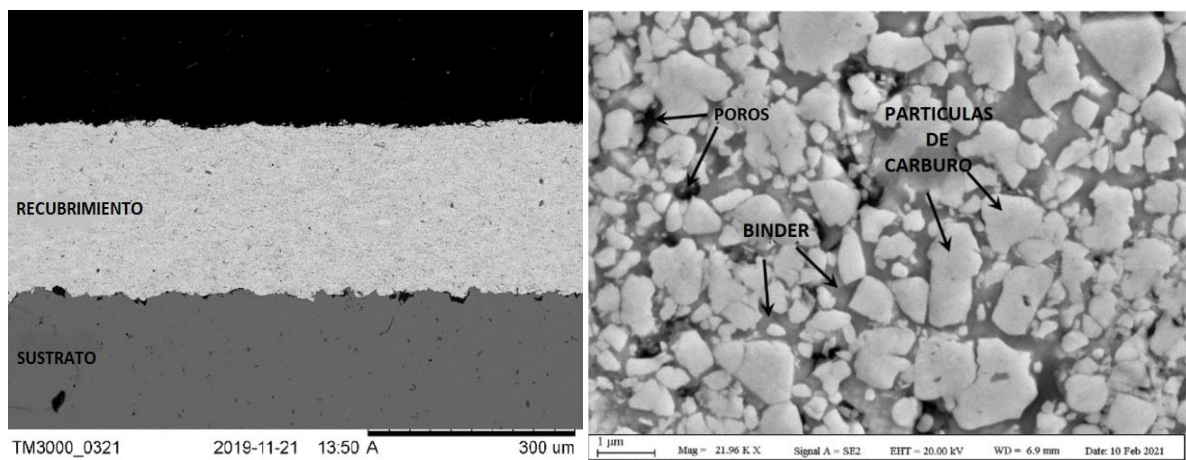
#### 4.2.2 Caracterización recubrimientos

En el proceso de pulverización, el polvo desempeña un papel fundamental, ya que es el material que se proyecta a alta velocidad hacia la superficie objetivo, es decir, el sustrato. Al impactar, forma una capa protectora que se adhiere firmemente al sustrato, restaurando de esta forma la superficie y prologando la vida útil del equipo.

Continuando con la importancia del material utilizado, los polvos compuestos de carburo de tungsteno (WC), específicamente el carburo de tungsteno-Cobalto-Cromo (WC-Co-Cr), han sido utilizados ampliamente en aplicaciones tribológicas. Su capacidad para equilibrar la dureza con la tenacidad los hace perfectos para aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste, abrasión, impacto y corrosión [12], [39], [45], [46], [47]. Estos polvos pertenecen a la familia de materiales cerámico-metal conocidos como cermets. La microestructura de este cermet incluye una fase dura de WC como componente principal, incrustada en una base de Cobalto (Co) y Cromo (Cr) que actúan como aglutinantes. Este aglutinante, también conocido como *binder*, es proporcionar no solo para proporcionar tenacidad al material sino también resistencia al desgaste y a la oxidación [47].

Adicionalmente, Saito et al. [48] investigaron como las propiedades mecánicas son afectadas por el contenido de Co y el tamaño de grano de WC. Sus hallazgos sugieren que un mayor contenido de Co y un grano de WC más grande aumentan la susceptibilidad al desgaste, es decir, la tendencia del material a deteriorarse debido a la fricción y el desgaste durante su uso.

Para ilustrar estos conceptos, la figura 7 presenta micrografías del recubrimiento de WC-Co-Cr aplicado mediante la técnica HVOF, mostrando diferentes aumentos. En la figura 4.a se aprecia claramente la interfaz recubrimiento-sustrato. La figura 4.b, se pueden identificar los poros presentes en la microestructura, así como las partículas del carburo (WC) y el material de unión conocido como aglutinante.



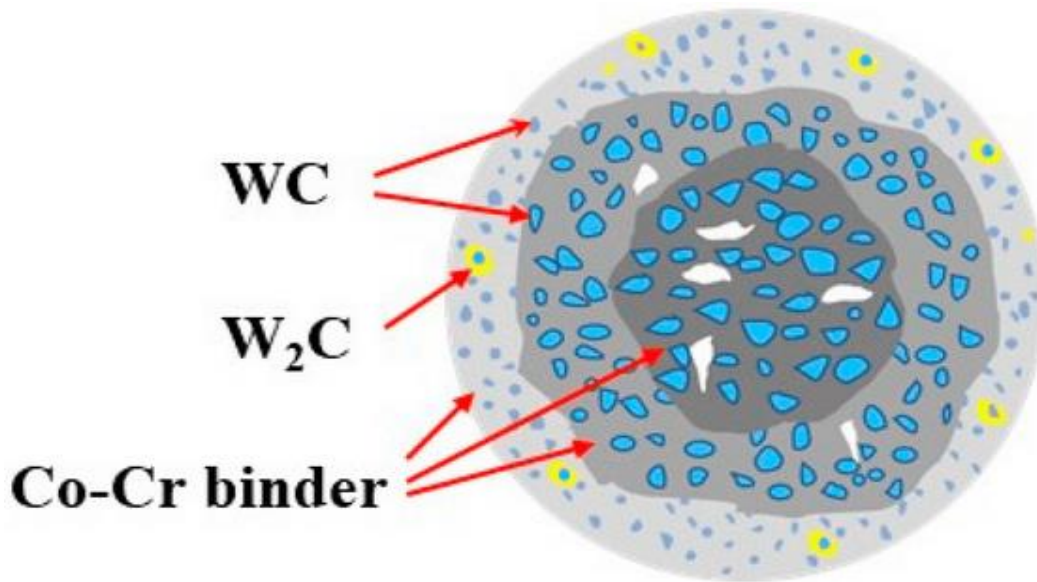
(a)

(b)

**Figura 7.** Imágenes SEM de secciones transversales de los recubrimientos WC-Co-Cr [49].

Complementariamente, la figura 8 proporciona una representación visual de la distribución de la microestructura de una partícula de polvo cermet WC-Co-Cr que ha sido pulverizada mediante la técnica HVOF. En esta microestructura, se identifican diferentes fases presentes, como el WC, W<sub>2</sub>C y Co-Cr. Es importante destacar que, si bien esta partícula de polvo es característica del proceso HVOF, su composición y distribución no difieren significativamente en el proceso HVOF. Como se mencionó anteriormente, la menor temperatura durante el vuelo en la técnica HVOF contribuye a reducir la oxidación

de ciertos elementos, como en el carbono, esto impide la descarburización y, por ende, la presencia de la fase  $W_2C$  en las partículas.



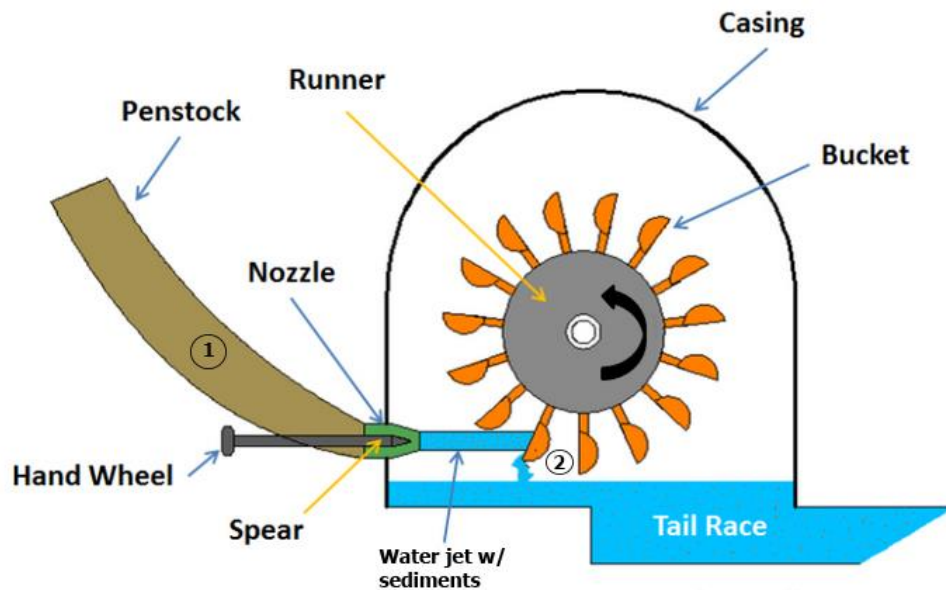
**Figura 8.** Ilustración de la formación de las microestructuras de WC-10Co-4Cr rociados por HVOF [50].

Numerosos estudios confirman la ausencia de la fase  $W_2C$  en los recubrimientos de WC-Co-Cr producidos mediante la técnica HVOF. En estos recubrimientos, no se observa oxidación o descomposición, lo que resulta en una retención casi completa y total ausencia de la fase  $W_2C$  [30], [31], [51]. Los resultados obtenidos para el recubrimiento de WC-12Co respaldan esta afirmación, ya que solo se identificaron componentes de W, C y Co, lo que confirma la falta de oxidación o descarburización, asegurando la calidad del recubrimiento [52]. Además, en un estudio realizado por Liu et al. [12], se investigó una mezcla de ambos tipos de polvos, lo cual es muy poco común. Se encontró que un mayor

contenido de WC-12Co en el polvo WC-10Co-4Cr mejoraba el rendimiento del recubrimiento al mejorar sus propiedades, a pesar de que incluso con una pequeña adición se observaron algunas fases como W2C o Co3W3C.

### 4.3 Daños en cucharas de turbina Pelton

Para comprender los mecanismos de daño de una turbina Pelton, es necesario entender primero su funcionamiento. Como ilustra figura 9, el proceso operativo de la turbina se divide en dos etapas. Inicia con la aceleración del flujo de agua cayendo por las toberas (*penstock*) hasta la boquilla, generando así la energía cinética en forma de un chorro de alta velocidad. En la segunda, el choque del chorro de agua con las cucharas provoca el giro de la rueda de la turbina, transformando la energía cinética en energía mecánica.

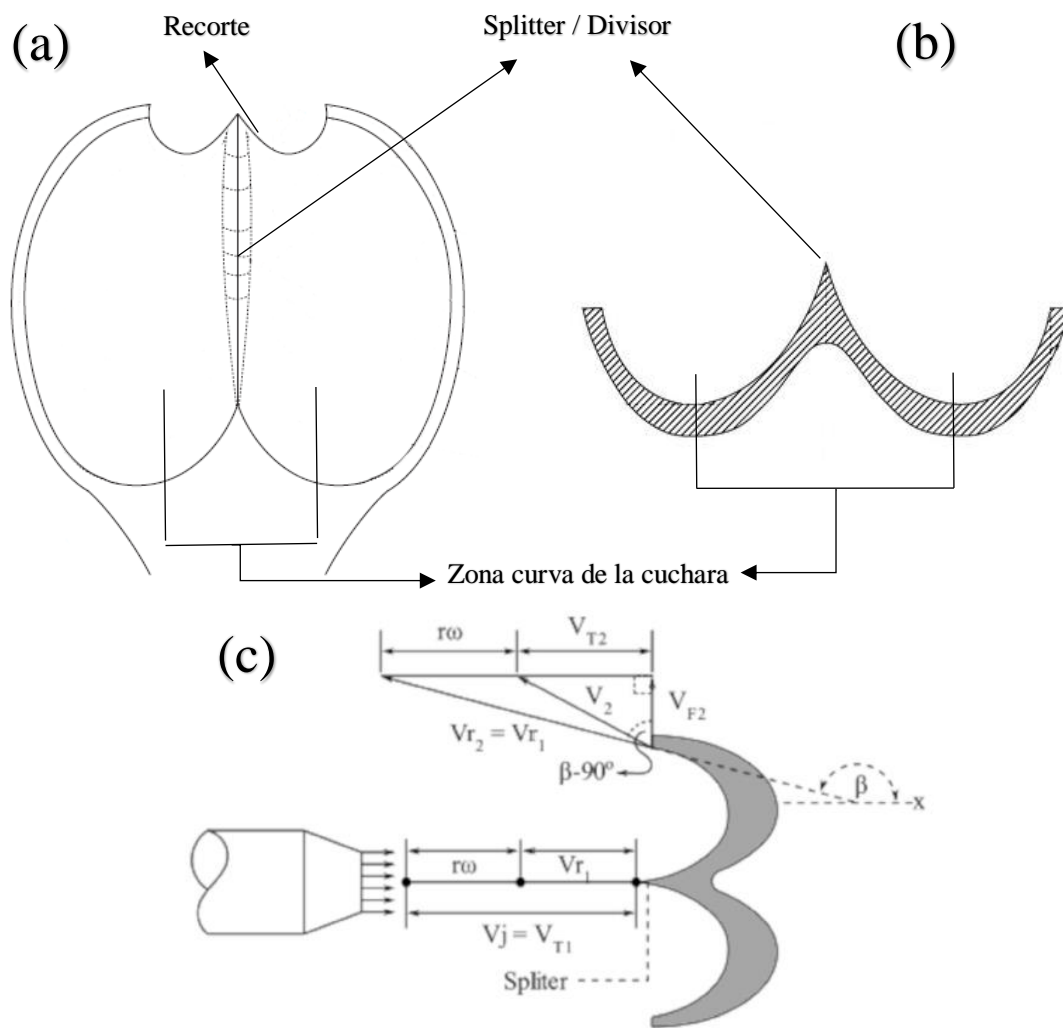


**Figura 9.** Componentes principales de una turbina [53].

Este flujo de energía nos lleva directamente a examinar las cucharas, conocidas también como “*Bucket/Blades*” en inglés, que son fundamentales en este proceso. Estas cucharas

son las encargadas de recibir el impacto directo del chorro de agua, golpeando perpendicular contra el divisor y dividiéndose así en dos flujos simétricos que recorren zona curva de la cuchara. Esta parte del diseño incluye una superficie elíptica, referida como “zona curva de la cuchara” en la figura 10, optimizada con un ángulo ideal para la salida del agua. Los parámetros principales que afecta la eficiencia de las cucharas son la longitud y el ángulo de salida del agua, y su ajuste adecuado es clave para maximizar la eficiencia de la turbina [54].

A continuación, el triángulo de velocidades, figura 10.c, funciona como una herramienta indispensable en el diseño de las cucharas. Este triángulo permite analizar el comportamiento del flujo del agua en interacción con los componentes de la turbina a través de la descomposición y comprensión de las velocidades implicadas en el proceso. Se estudia tanto la velocidad tangencial del agua al entrar y salir de la cuchara, como la velocidad axial del agua, que son parámetros cruciales para la eficiencia en la transformación de energía [55].



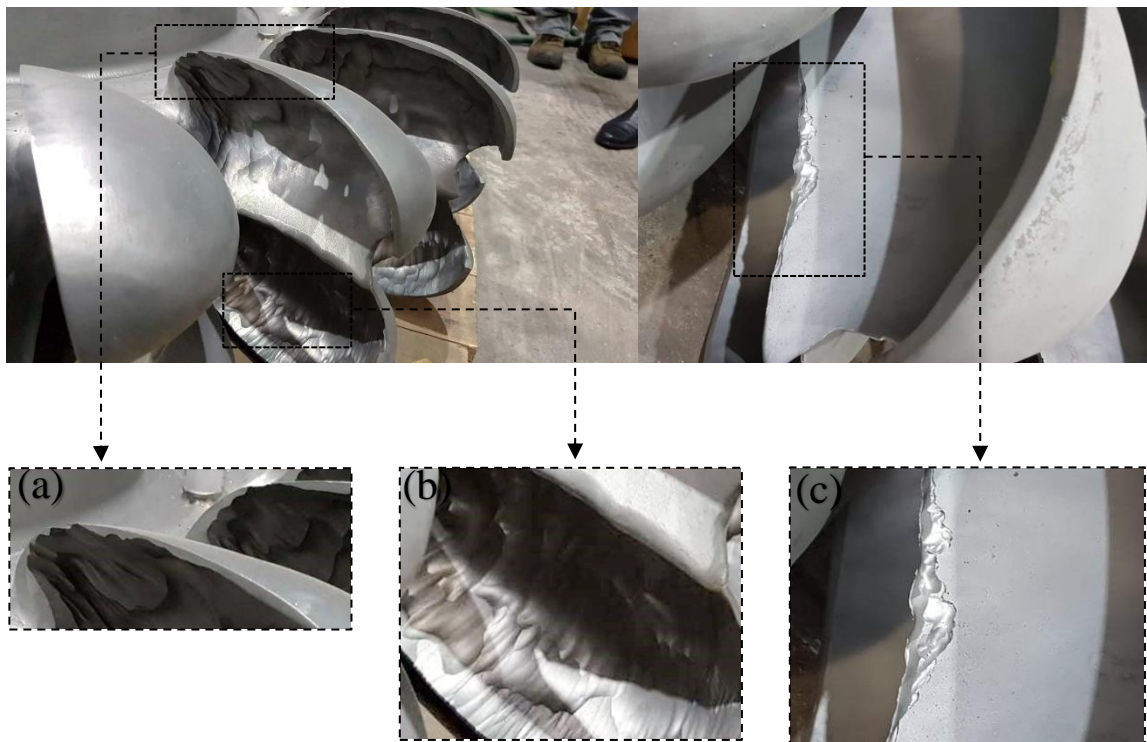
**Figura 10.** Diseño cuchara de turbina Pelton (a) vista superior, (b) corte transversal y (c) triangulo de velocidad [54].

#### 4.3.1 Mecanismos de daño

El flujo de agua utilizado en el proceso de la turbina viene cargado con sedimentos, cuyo porcentaje puede variar según las condiciones climáticas. La presencia de sedimentos tiene un efecto negativo en las cucharas, provocando daños por erosión y cavitación. La erosión, a partir de este punto nombrada como erosión hidroabrasiva, se define como la

pérdida gradual de material por deformaciones repetitivas y acciones de corte provocadas por el flujo de agua a alta velocidad.

La erosión hidroabrasiva genera rugosidad en la superficie de la cuchara, alterando su geometría y perturbando el flujo del agua. Esto se ilustra en la figura 11. Como resultado, el rendimiento del proceso se ve afectado al cambiar los ángulos específicos y dimensiones de las cucharas, lo que afecta la vida útil de la turbina y resulta en pérdidas económicas para la industria debido al mantenimiento requerido y a las interrupciones en su funcionamiento [4], [6].



**Figura 11.** Cucharas de turbina Pelton dañadas por erosión e hidroabrasión.

Además, la figura 11 muestra daños significativos en las cucharas. Por ejemplo, la figura 12.a muestra dos cucharas con una evidente pérdida de espesor, mientras la figura 12.b

exhibe diversos patrones típicos de desgaste irregular, con una pérdida total de la curvatura de la cuchara. En la figura 11.c, se observa un daño en la forma del *splitter*, lo cual genera una mala división del flujo del agua y erosión dispereja entre las zonas curvas de la cuchara.

De igual forma, estos daños en las cucharas están estrechamente relacionados con parámetros del proceso tales como el sedimento del flujo, material de la cuchara y variables operacionales [56].

**Tabla 1**

*Características de los parámetros del proceso en los daños de la cuchara*

<b>Parámetros</b>	<b>Características</b>
Sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño</li> <li>• Forma</li> <li>• Dureza</li> <li>• Concentración (%)</li> </ul>
Material de la cuchara	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturaleza química</li> <li>• Propiedades elásticas</li> <li>• Dureza superficial</li> <li>• Morfología superficial</li> </ul>
Operacionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad</li> <li>• Ángulo de impacto</li> </ul>

*Fuente:* “Coalesced effect of cavitation and silt erosion in hydro turbines” Gohil et al. (2014) [56].

La cavitación se atribuye principalmente a la implosión de burbujas a alta velocidad sobre la superficie de la cuchara, un fenómeno que se intensifica bajo condiciones de flujo turbulento que contiene partículas suspendidas[4]. Thapa et al.[57] indican que la cavitación es más propensa a activarse una vez que la erosión hidroabrasiva ha generado rugosidad en la superficie de la cuchara, dado que ambos suelen ocurrir en zona de alta velocidad. Estos mecanismos de daños tienen un efecto sinérgico, produciendo un mayor daño que sus efectos individuales.



**Figura 12.** Diagrama de flujo de activación de los mecanismos de daño [48].

Para mitigar estos efectos adversos, es crucial profundizar en el entendimiento de los mecanismos de daños. Varios estudios se han centrado en la erosión hidroabrasiva en las cucharas Pelton. Por ejemplo, Rai et al. [6] llevaron a cabo un estudio inicial en 2017 utilizando escaneo 3D para clasificar las zonas donde las cucharas experimentan erosión y comprender como los flujos afectan a las cucharas una vez erosionadas. Este método por permitir mediciones más precisas de profundidad, perfil y pérdida de material. En un segundo estudio [8], se desarrolló un modelo analítico para estudiar la hidroabrasión en

turbinas Pelton fabricadas con diferentes materiales, como acero inoxidable, con recubrimiento y bronce. Este estudio reveló que el mecanismo de daño varía según el material utilizado: las cucharas de turbinas con recubrimiento desarrollan grietas, mientras que las metálicas sufren deformación plástica, lo cual está estrechamente relacionado con el patrón de flujo.

Adicionalmente, otras investigaciones como el estudio realizado por Li y Saw [7] se centraron en las fuerzas a las que están expuestas las cucharas de la turbina, las cuales generan ciclos repetitivos de carga y pueden provocar tensiones por fatiga. Mediante simulación computacional, predijeron los ciclos de vida por fatiga y los daños en diferentes metales de la cuchara de la turbina. Los resultados identificaron patrones de fatiga y tensiones que afectan la resistencia y durabilidad entre cada material de fabricación, destacando el acero inoxidable como la opción más confiable y resistente.

#### **4.4 Simulación dinámica de fluidos computacional**

La aplicación de CFD en el proceso de pulverización térmica HVAF nos permite visualizar y analizar la distribución de temperatura, la interacción de partículas y el comportamiento de los flujos de gases y partículas bajo diferentes parámetros de operación. Este método se traduce en una alternativa eficiente y rentable que complementa los enfoques experimentales convencionales, los cuales se basan en el ensayo y error.

Además, en el proceso HVAF, podemos emplear dos perspectivas interrelacionadas para comprender su funcionamiento. En primer lugar, desde la perspectiva del recubrimiento y sus características, donde la calidad del recubrimiento está intrínsecamente ligadas al

estado físico y químico de las partículas de polvo que impactan en el sustrato. En contraste, el segundo enfoque, más complejo, analiza la dinámica de fluidos del proceso de pulverización térmica, abordando una combinación de fenómenos físicos y químicos, tales como flujos turbulentos, transferencia de calor, combustión y transiciones de fases.

Sin embargo, es importante notar que, aunque ambos enfoques están directamente relacionados con los parámetros del proceso, tales como la geometría de la pistola de pulverización, la relación combustible/combustión, el flujo de masa y las características del polvo, es importante notar que los estudios de CFD específicos para HVOF son más escasos que para el proceso HVOF [17], [33]. Esta escasez ha limitado la comprensión fundamental de los procesos, contribuyendo a la falta de comprensión e implementación de la técnica.

#### **4.4.1 Modelos matemáticos**

La dinámica de fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en movimiento y se basa en principios fundamentales, incluyendo las leyes de conservación de masa, energía y momento, así como las ecuaciones que describen el transporte de especies químicas. Estos principios son esenciales para el desarrollo de modelos que simulan el comportamiento de los fluidos bajo diversas condiciones y aplicaciones.

Dentro del ámbito de CFD, el software ANSYS FLUENT aplica estos principios mediante métodos numéricos y algoritmos, realizando múltiples iteraciones para analizar y resolver problemas con flujos de fluidos [16], [17], [58]. Para profundizar en cómo se lleva a cabo este proceso, se describen las ecuaciones que gobiernan estos principios:

- **Conservación de la masa**

La ley de conservación de masa, también conocida como principio de continuidad, establece que la masa no se crea ni se destruye en un flujo cerrado, asegura que la masa total dentro un volumen controlado se mantiene constante a lo largo del tiempo, a menos que haya flujos de masa hacia dentro o fuera del volumen. En términos matemáticos, esto expresa a través de la ecuación que lo gobierna:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

, donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\vec{v}$  es el vector de velocidad del fluido y  $\nabla \cdot (\rho \vec{v})$  divergencia del flujo de masa.

- **Conservación de momentum**

Esta ley se expresa mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son fundamentales en la dinámica de fluidos para describir el flujo de líquidos y gases. Estas ecuaciones modelan como el momento de un fluido cambia en respuesta a las fuerzas internas y externas, y se describe en la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \quad (\text{Ec. 2})$$

Aquí,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\frac{\partial u_i}{\partial t}$  es la variación de la velocidad en la dirección  $i$  respecto al tiempo,  $u_k$  representa los componentes de la velocidad del fluido,  $\frac{\partial P}{\partial x_i}$  es el

gradiente de presión en la dirección  $i$ , y  $\frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k}$  refleja la variación de las tensiones viscosas con la posición del fluido.

- **Conservación de energía**

Se relaciona con la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía interna de un sistema cerrado es constante. Se aplica la siguiente ecuación para modelar la transferencia de calor y los efectos térmicos dentro del flujo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_k \frac{\partial P}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial x_k} \left( \rho D \frac{\partial h}{\partial x_k} \right) + \Phi_D \quad (\text{Ec. 3})$$

En detalle,  $\frac{\partial h}{\partial t}$  representa la variación de la entalpía respecto al tiempo. El término  $-\rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$  corresponde a la convección de energía debido al movimiento del fluido;  $\frac{\partial P}{\partial t}$  indica la variación de la presión respecto al tiempo.  $u_k \frac{\partial P}{\partial x_k}$  describe el trabajo realizado por la presión en el fluido en movimiento. El término  $\rho D \frac{\partial h}{\partial x_k}$  hace referencia a la difusión de energía a través del gradiente de entalpía, donde  $D$  es la difusividad térmica. Por último,  $\Phi_D$  representa la disipación de energía, la cual puede deberse a la viscosidad o las fricciones y resistencia internas del fluido.

- **Transporte de especies**

Esta ecuación describe como la concentración de una especie química en particular cambia dentro de un flujo debido a la convección, difusión y reacciones químicas. La ecuación que lo gobierna es:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho Y_\beta u_i) = -\frac{\partial J_{\beta,i}}{\partial x_i} + R_\beta + S_\beta ; \beta = 1, 2, \dots, N_{sp} - 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

Con  $\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho Y_\beta u_i)$  para describir el transporte de una especie específica ( $\beta$ ) en la velocidad del fluido, considerando  $\rho$  como la densidad y a  $Y_\beta$  como la fracción másica.  $-\frac{\partial J_{\beta,i}}{\partial x_i}$  representa el flujo difusivo con  $J_{\beta,i}$  como el flujo de masa de la especie  $\beta$  debido a la difusión. Por otra parte,  $R_\beta$  y  $S_\beta$  corresponde a las tasas de generación y eliminación de la especie  $\beta$  a través de las reacciones químicas. Por último, la ecuación es aplicable para todas las especies del sistema ( $\beta$ ), pudiendo variar desde 1 hasta  $N_{sp} - 1$ , con  $N_{sp}$  como el número total de especies.

Comprender estos principios fundamentales de la dinámica de fluidos es crucial para el desarrollo y la aplicación de modelos de turbulencia. Estos modelos no solo deben ser capaces de simular adecuadamente las características del flujo, sino también cumplir con las leyes de conservación química y física para garantizar resultados precisos y confiables.

Para continuar, los modelos de turbulencia son otra variable importante que considerar en los estudios de CFD. La turbulencia se caracteriza por flujos caótico y vórtices, y presenta un comportamiento complejo y desafiante de modelar y predecir. Por lo tanto, los modelos de turbulencia son herramientas matemáticas diseñadas para simular el comportamiento de los flujos turbulentos. Debido a la alta complejidad de la turbulencia, estos modelos no resuelven cada pequeña escala de movimiento, sino que se centran en las escalas más grandes y promedian los efectos de las escalas menores, así evitando un alto coste computacional en la simulación.

Existen múltiples modelos de turbulencia, como LES, DES, RANS, URANS. Las investigaciones de HVOF utilizan principalmente los modelos k-ε RNG (*Re-normalization group*) y k-ε *Realizable*, que están clasificados dentro de los modelos de turbulencia RANS. Estos modelos son los utilizados debido a su eficacia en las simulaciones computacionales del proceso HVOF [59], [60]. A continuación, se detallan estos modelos:

- **k-ε Realizable**

El modelo k-ε Realizable es una evolución del modelo k-ε estándar, diseñado para mejorar la precisión en la predicción de flujos separados y vórtices complejos. Este modelo introduce modificaciones en las constantes del modelo y en las fórmulas de las tasas de disipación, lo que resulta en mejoras en la predicción. El “*Realizable*” se refiere a que las predicciones del modelo cumplen con ciertas restricciones matemáticas y físicas, asegurando que los resultados sean físicamente posible según los principios fundamentales. Las ecuaciones de este modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{1\varepsilon} S - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{K + \sqrt{\nu \varepsilon}} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{Con: } C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right]; C_{2\varepsilon} = 1.9; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.2$$

Donde para la ecuación 5,  $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j}$  representan la tasa de cambio de la energía cinética turbulenta y el transporte convectivo de  $k$ , respectivamente.  $P_k - \rho \varepsilon$  es la

producción de energía cinética turbulenta debido a las deformaciones del flujo, y la pérdida de  $k$  debido a la disipación en pequeñas escalas de turbulencia.  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$  representa la difusión de  $k$ , donde  $\mu$  es la viscosidad molecular y  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta modelada, con  $\sigma_k$  siendo el número de Prandtl turbulento para  $k$ . Para las ecuaciones 6,  $\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\mu_j\varepsilon)}{\partial x_j}$  representa la tasa de cambio temporal de  $\varepsilon$  y el transporte convectivo de  $\varepsilon$ , respectivamente. Por otro lado,  $C_1\varepsilon S - C_{\varepsilon 2}\rho$  son los términos de disipación de  $\varepsilon$ , con  $S$  la tasa de deformación del fluido,  $C_1$  y  $C_{\varepsilon 2}$  son constante empíricas. Finalmente,  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$  refiere a la difusión de  $\varepsilon$ , con  $\sigma_\varepsilon$  siendo el número de Prandtl turbulento para  $\varepsilon$ .

- **RNG k- $\varepsilon$**

El modelo RNG k- $\varepsilon$  es una mejora del modelo k- $\varepsilon$  estándar. Utiliza la teoría de grupos de renormalización de la física estadísticas que trata de capturar los fenómenos físicos en diferentes escalas, desde las más grande hasta la más pequeñas para lograr entender como los cambios en pequeña escala afectan los comportamientos en gran escala. La variante RNG modifica los coeficientes del modelo y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta para mejorar la precisión en flujos con fuertes curvatura y viscosidad turbulenta en flujos de alta velocidad. Este modelo también toma en cuenta la influencia de los vórtices en la turbulencia, lo cual resulta en una mayor precisión en la predicción del flujo vorticial. Su ecuación está dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 7})$$

, la ecuación 7 describe la dinámica de la energía cinética turbulenta  $k$  en un flujo fluido, modelada por la ecuación de  $k$ . El término  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)$  representa como cambia la energía cinética ( $k$ ) respecto al tiempo y la posición.  $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)$  describe el transporte convectivo de  $k$  a través del flujo, donde  $u_i$  son las componentes de la velocidad del fluido.  $P_k$  es la producción de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad en el flujo, y  $\rho \varepsilon$  representa la disipación de  $k$ , que es la energía perdida debido a los efectos viscosos y turbulentos. Los términos  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$  modela la difusión de  $k$ , tanto por la viscosidad molecular  $\mu$  como por la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , ajustada por el número de Prandtl turbulento para la energía cinética,  $\sigma_k$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

Aquí, la ecuación 8 representa la ecuación de tasa de disipación de energía  $\varepsilon$  en un flujo turbulento. El término  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)$  describe la variación temporal de la tasa de disipación por unidad de volumen, mientras que  $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j)$  describe el transporte convectivo de la disipación de energía a través del flujo.  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$ , es un término de difusión que representa la dispersión del campo de disipación a través del flujo, influenciado tanto por la viscosidad molecular  $\mu$  como por la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , ajustada por el número de Prandtl turbulento para  $\varepsilon$ ,  $\sigma_\varepsilon$ .  $\frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon)$  incluye los términos de producción y

destrucción de  $\varepsilon$ .  $C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$  son constantes empíricas del modelo que ajustan la tasa a la que la energía cinética turbulenta se convierte en calor, con  $P_k$  representando la producción de energía cinética debido a los gradientes de velocidad.

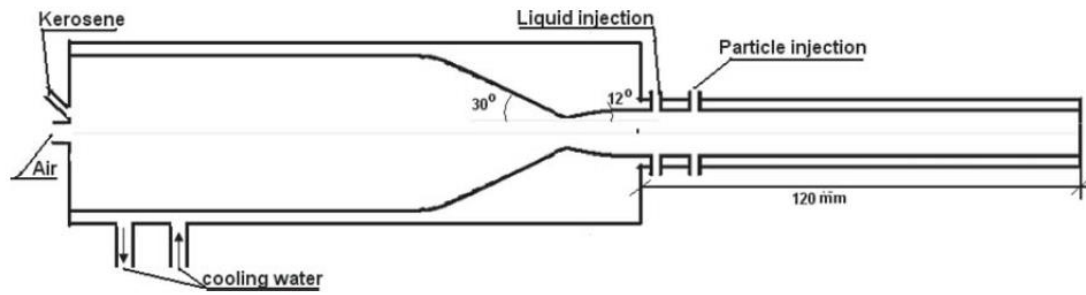
$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 9})$$

La ecuación 9 es una formula fundamental en los modelos de turbulencia para calcular la viscosidad turbulenta,  $\mu_t$ .  $C_\mu$  es una constante empírica del modelo, que afecta la magnitud de  $\mu_t$ . Por otro lado,  $k$  la energía cinética turbulenta, que indica la energía por unidad de masa contenida en las turbulencias. El termino  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, que muestra la velocidad a la que la energía de la turbulencia se pierde.

#### **4.4.2 Simulación en técnica pulverización térmica HVOF**

En el contexto de la técnica de pulverización térmica HVOF, estudios experimentales se han empleados pistolas como la UNIQUECOAT M3™ y las KERMETICO AK06 y AK07 [27], [39], [41]. Por otro lado, las simulaciones computacionales de HVOF han centrado su atención en el modelo de la pistola KERMETICO AK07 que utiliza propano como combustible [16], [17], [33], [61], [62], [63]. Cada enfoque en estos estudios aporta una perspectiva única que contribuye al campo con nuevos datos. Uno de los trabajos pioneros en la simulación de HVOF mediante CFD fue llevado a cabo por Yuan et al. [15], presentando un análisis de la técnica LTHVOF (*Low temperatura high velocity air fuel*). Este estudio propone la inyección de agua junto con el polvo para controlar la

temperatura del gas, influyendo así en la transferencia de calor de las partículas. La esquematización de la pistola utiliza se puede ver en la siguiente figura:

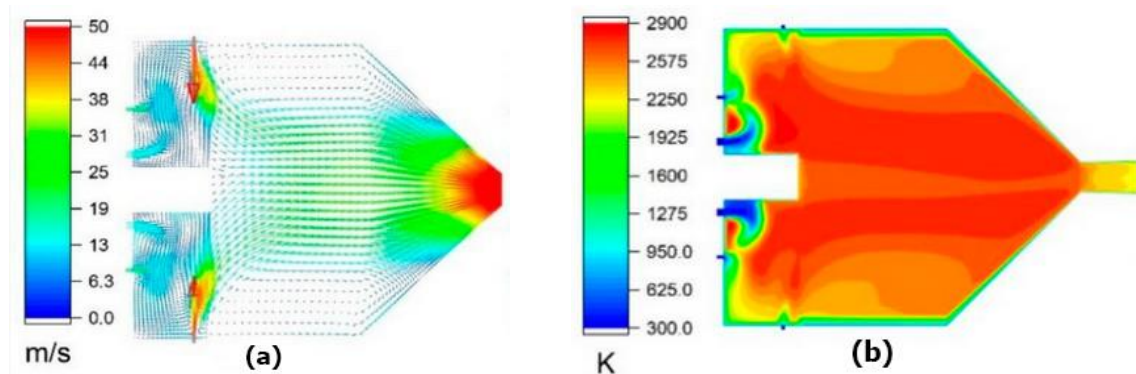


**Figura 13.** Esquematización pistola HVAF enfriada por agua del modelo de Yuan et al. [15]

Con esta configuración, la temperatura y la velocidad del gas alcanzan aproximadamente los 600-700 K y 700-800 m/s, respectivamente. Aunque esta funcionalidad es similar a las de la pistola actuales, como la AK07 que nos centraremos, el avance tecnológico y las simulaciones han permitido ajustar el enfriamiento del proceso para su optimización, pasando de un sistema basado en agua a uno que utiliza aire comprimido.

Enfocándonos en el modelo KERMETICO AK07, el estudio de Liu et al. [17] explora el campo de velocidad y temperatura, así como la composición de los recubrimientos, empleando un modelo tridimensional (3D) de la pistola KERMETICO AK07. Dicho modelo integra una innovación al integrar una lámina cerámica que separa la cámara de mezcla de gases de la cámara de combustión para evaluar su impacto en el proceso. Además, introduce entradas radiales de aires, además de las axiales, para investigar su influencia la dinámica del flujo.

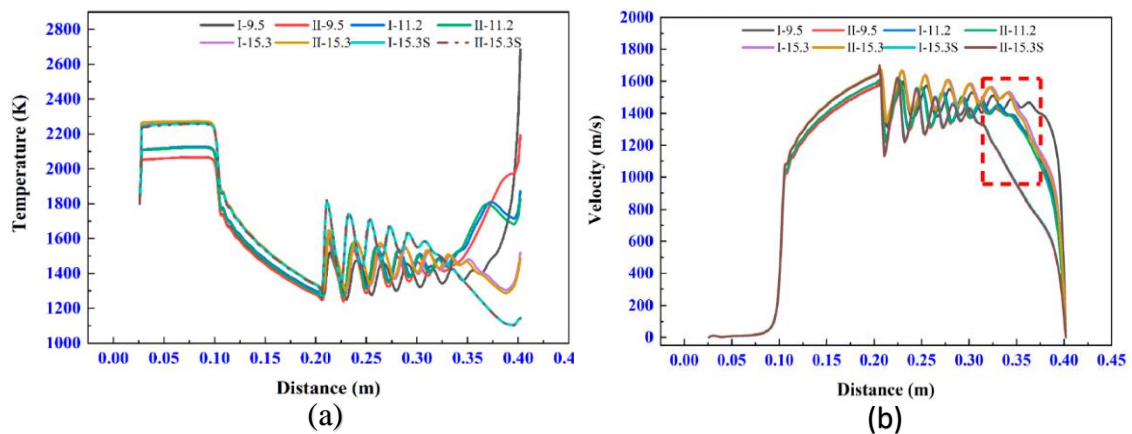
Continuando con este análisis, el estudio sobre influencia de la lámina cerámica en el flujo destaca que la incorporación de esta mejora la uniformidad del flujo de aire en términos de temperatura y velocidad. La lámina cerámica actúa como un rectificador que alinea y estabiliza el flujo de aire, facilitando una combustión más controlada y eficiente. En la figura 14, observamos el aumento de vórtices en la cámara de combustión provocado por la lámina cerámica, lo cual indica que hay un mayor tiempo de residencia y un recorrido extendido de estos elementos en la cámara. Este aumento de vórtices, y el consecuente mayor tiempo de residencia en la cámara de combustión, se correlacionan con una mejora en la eficiencia del proceso, destacando la importancia de un diseño detallado en la optimización de la técnica.



**Figura 14.** Distribución interna de vectores de velocidad (a) y temperatura (b) en la pistola de pulverización [17].

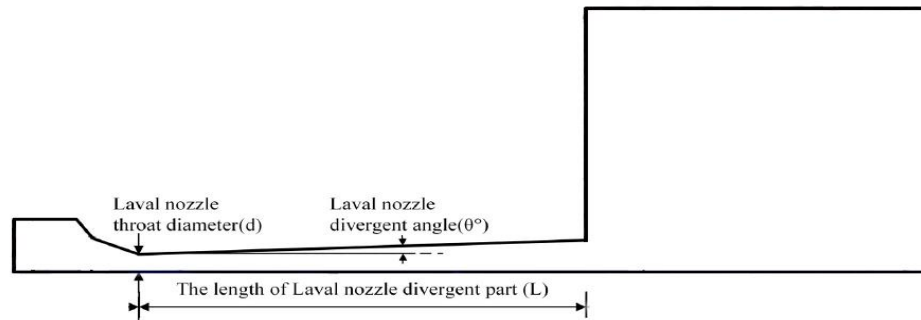
Además, la influencia de las reacciones químicas en la velocidad y la temperatura se pueden observar figura 15. El estudio detalla como los métodos utilizados de las reacciones químicas influyen mínimamente en la velocidad del flujo en la zona de la pistola (0-0.2m), y cómo, ya en la zona intermedia (0.2-0.4m), se produce un aumento y

disminución periódicos de la velocidad. Las diferencias se hacen más notorias en la zona de choque (0.32-0.4m), donde las reacciones químicas afectan la estabilidad de la velocidad debido a las ondas de choques formadas por la expansión del aire. En cuanto a la temperatura, mostrada en la figura 15.b, las diferencias son mínimas a largo del dominio hasta la zona de choque (0.32-0.4m), momento en el cual las temperaturas se vuelven significativas.



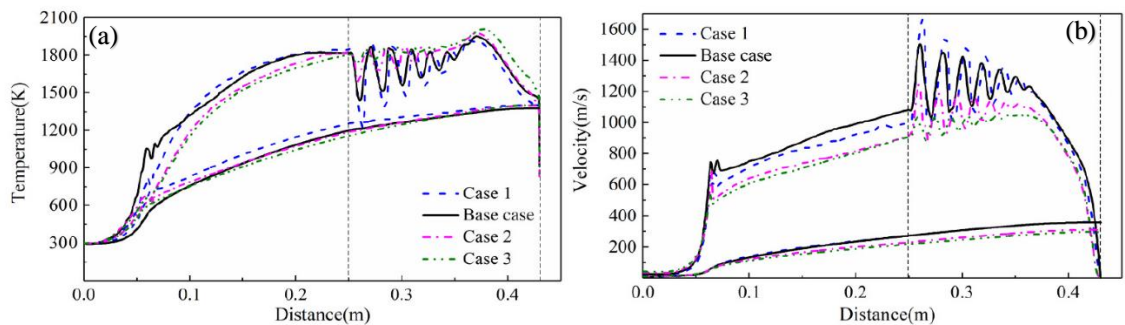
**Figura 15.** Velocidades (a) y temperatura (b) de los distintos flujos según el método de reacción química empleado [17].

Gao et al. [33] investigan los efectos de los parámetros de operación y la geometría de la boquilla en HVOF, basándose en la modelación en dos dimensiones (2D) de la pistola AK07. En este modelo se simulan variaciones en el diámetro de la garganta de la boquilla, el ángulo de la sección divergente y la longitud de la boquilla, como se ilustra en la figura 16, para analizar el impacto de estos cambios en la pulverización.



**Figura 16.** Esquematación pistola AK07, destacando las partes que se varían en los distintos casos [33].

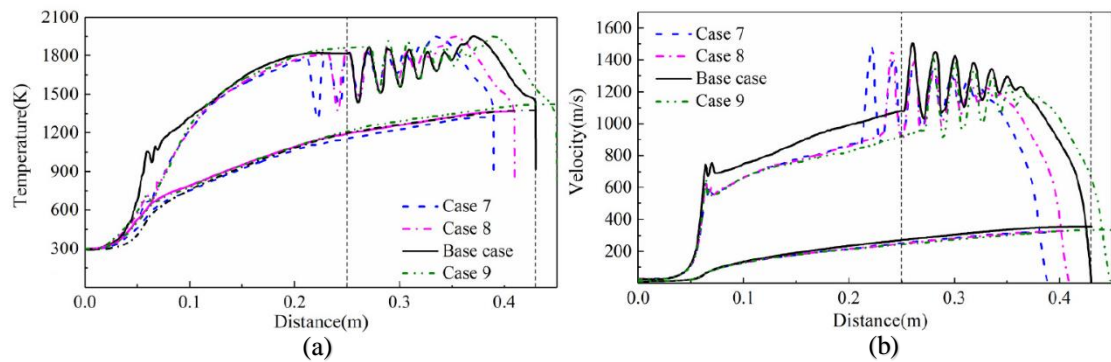
Se observa que una disminución del diámetro de la boquilla, por ejemplo, de 13.8mm a 11.4 mm, aumenta la velocidad del flujo y puede mantener un alto número de Mach. Una reducción adicional del diámetro de la boquilla a 10.2mm provoca fluctuaciones leves en el número de mach a la salida de la boquilla, pero incrementa la velocidad del flujo en la fase de chorro libre (0.25-0.4 m). Sin embargo, los cambios en el diámetro en la boquilla no tienen un efecto considerable en la temperatura del flujo.



**Figura 17.** Distribución de la temperatura (a) y velocidad (b) con la variación de diámetro de la boquilla[33].

Además, la temperatura del flujo se ve significativamente influenciada por el ángulo de divergencia de la boquilla. Cuando este ángulo de divergencia es de  $0.3^\circ$  o menos, la temperatura alcanza hasta 1050K. Si el ángulo supera los  $0.3^\circ$ , la temperatura disminuye a 700K. Este comportamiento se debe a que un ángulo de divergencia menor reduce el volumen de la sección divergente de la boquilla, elevando la temperatura. Similarmente, la velocidad del flujo también se ve significativamente afectada por el ángulo de divergencia de la boquilla. Al reducir de  $0.5^\circ$  a  $0.2^\circ$ , la velocidad del flujo de llama aumenta en un 36%, permitiendo mantener altas velocidades del flujo y optimizando la aplicación del material sobre el sustrato.

Finalmente, un aumento en la longitud de la sección divergente de la boquilla, de 150 mm a 210 mm la longitud, resulta en aumento del 7% en la temperatura de las partículas permanecen más tiempo en el flujo, permitiéndoles absorber más calor. Sin embargo, variaciones en la longitud de esta sección no tienen impacto significativo en la velocidad del flujo, sugiriendo que la longitud óptima es de 190 mm para obtener los mejores resultados en el proceso de pulverización.



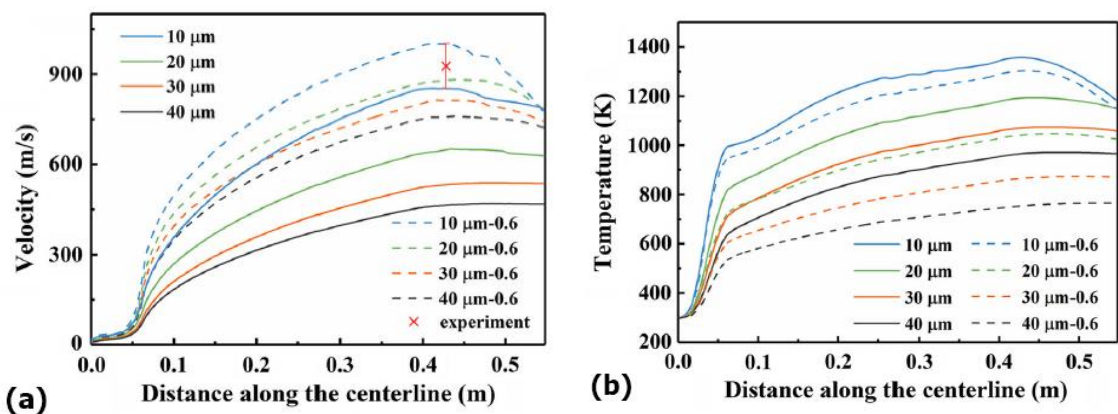
**Figura 18.** Distribución de la temperatura (a) y velocidad (b) con la variación de longitud de la boquilla[33].

Gao et al.[64], tras su estudio de la configuración de la boquilla, realizaron un segundo estudio basado en este para evaluar los efectos del tipo de combustible utilizado propano e hidrogeno en la técnica HVAF. Los resultados revelan que, comparado con el uso del propano, el uso de hidrógeno como combustible en la fase gaseosa de HVAF produce una temperatura más baja y una velocidad más alta en el flujo optimizando el rendimiento y la calidad del recubrimiento.

Este enfoque innovador en la selección del combustible y la modificación de la configuración de la boquilla subraya el potencial de mejora en los métodos de protección superficial, ofreciendo una alternativa viable a las ya conocidas.

Por otro lado, Jian et al.[16] llevaron a cabo un modelado tridimensional (3D) para investigar la fase gaseosa y el comportamiento en vuelos de las partículas amorfas de Hierro (Fe) utilizando el diseño de la pistola AK07. Se analizó como el factor de forma del polvo influía en la velocidad de las partículas (figura 19), observando que las partículas no esféricas presentaban una mayor velocidad debido a su mayor resistencia al arrastre,

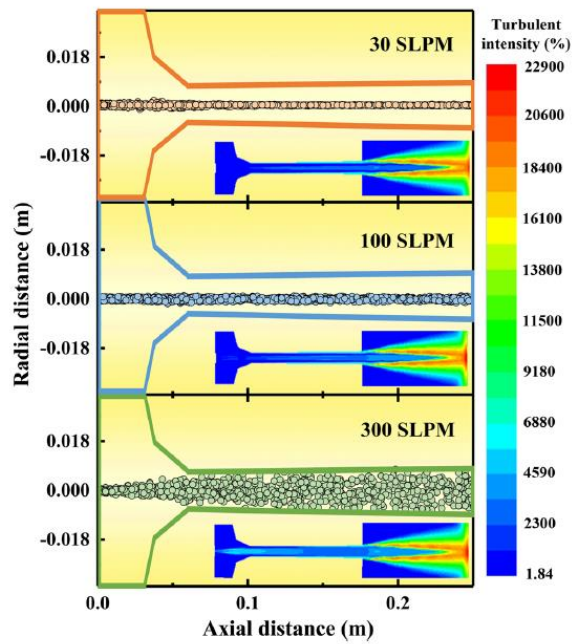
aunque su temperatura era más baja debido a su mayor velocidad y menor tiempo de vuelo. La simulación consideró el factor de forma, pero la velocidad de las partículas simuladas fue ligeramente menor que la observada experimentalmente, lo cual podría atribuirse a la omisión de la expansión térmica de las partículas y a las limitaciones del modelo de combustión utilizado.



**Figura 19.** (a) velocidad y (b) temperatura de diferentes factores de forma de partículas[16].

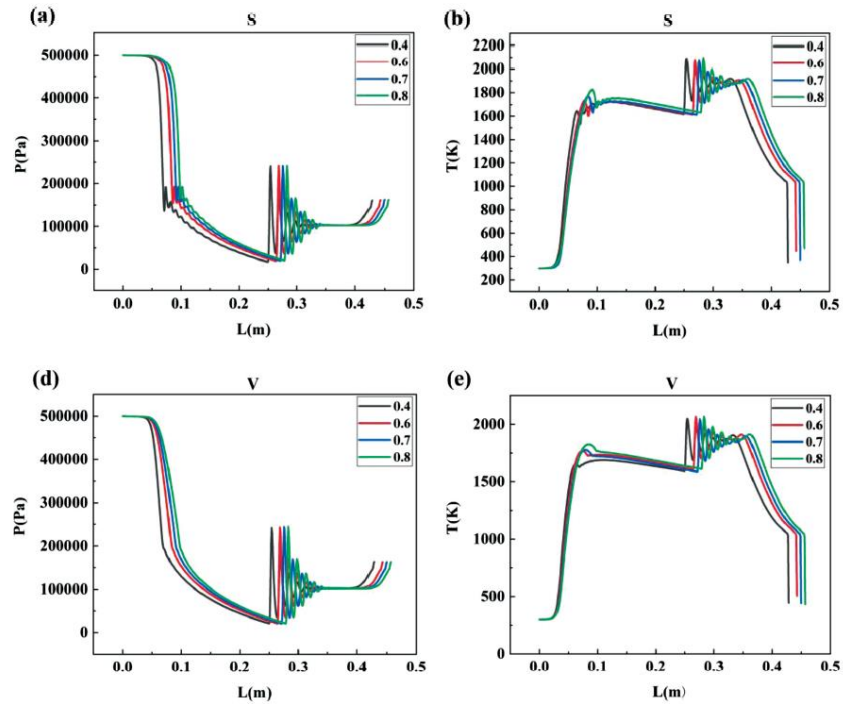
Los perfiles de vuelo de las partículas para un tamaño de 30 $\mu\text{m}$  a diferentes tasas de flujo de nitrógeno son mostrados en la figura 20. A una tasa de flujo de 300 SLPM (*standard litres per minute*), se observa una expansión notable del flujo de partículas que conduce a problemas de adhesión. Este fenómeno podría deberse a un aumento de la intensidad turbulenta en la cámara de combustión o en la boquilla. Esto confirma que la tasa de flujo del gas portador, en este caso el nitrógeno, puede afectar considerablemente las características del flujo, como la velocidad, y, por ende, el comportamiento de las partículas. Además, se destaca que la estabilidad del flujo de gas a alta velocidad se ve comprometida por el taponamiento debido a la acumulación de partículas en la sección de salida de la boquilla. Por lo tanto, es crucial controlar la tasa de flujo del gas dentro de los

rangos estudiados para evitar problemas durante el proceso de pulverización térmica HVOF.



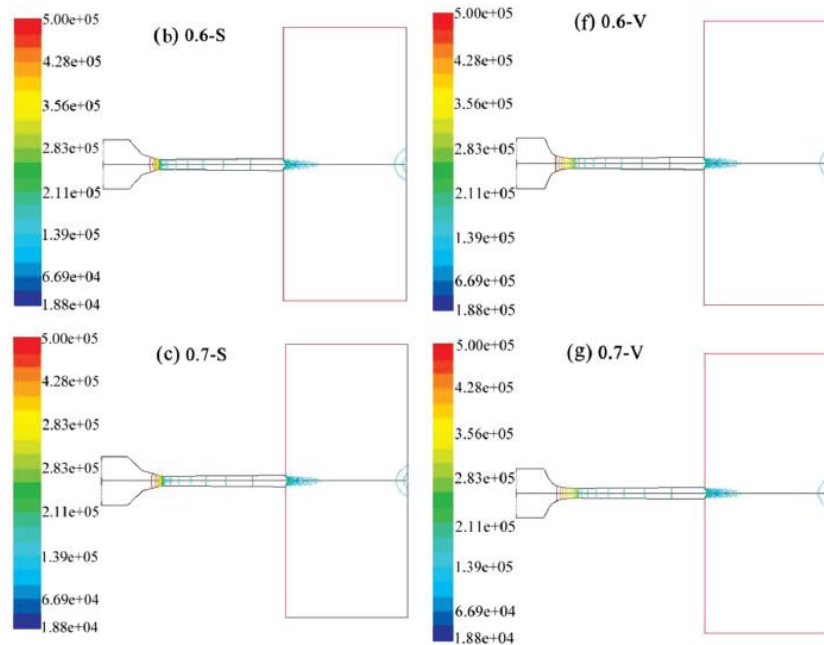
**Figura 20.** Perfiles de vuelos de las partículas a diferentes tasas de flujos de nitrógeno[16].

Siguiendo en esta línea de investigación, Wu et al. [63] llevaron a cabo un estudio bidimensional de la pistola AK07 para el proceso HVOF, donde se experimentó con la modificación de los parámetros de la boquilla. En su modelo, variaron la longitud de la sección convergente de la boquilla y la forma de su curva. La simulación se realizó en ocho diferentes para evaluar estos cambios.



**Figura 21.** Presión del gas para diferentes configuraciones de la boquilla [63].

La figura 21 muestra cuatro configuraciones de las ocho configuraciones posibles. Se observa que la variación en la longitud de la sección convergente no afecta significativamente la presión inicial de la cámara, la velocidad del gas o la temperatura. No obstante, se observa una mejora en la uniformidad y estabilidad del flujo de la llama al aumentar la sección curva.

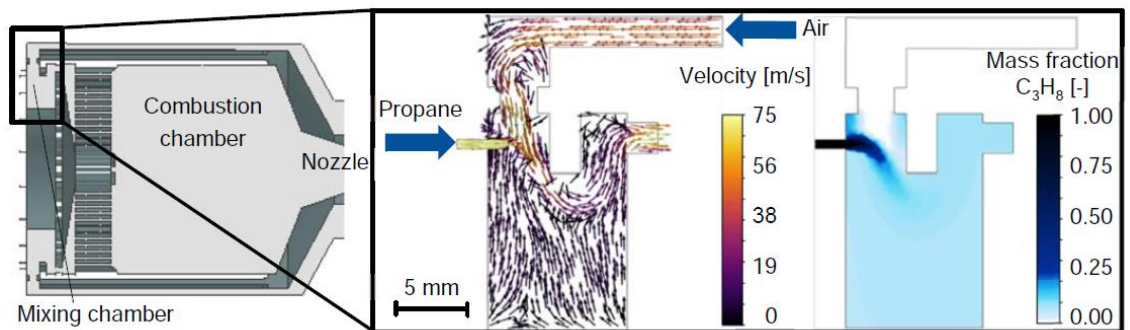


**Figura 22.** Velocidad del gas para diferentes configuraciones de la pistola [63].

Interesantemente, la longitud de la sección convergente de la boquilla no influye en la velocidad de las partículas, pero si aumenta la temperatura de estas últimas a medida que se incrementa dicha longitud. Al aumentar la curvatura de la sección convergente, se logra un incremento en la velocidad y una disminución en la temperatura de las partículas, como se muestra en la figura 22.

La configuración óptima de la sección convergente de la boquilla se ha determinado en una longitud de 49.7 mm con una forma curva. Esta configuración resulta en la proyección de partículas mayormente semi-fundidas y una alta velocidad de impacto, lo que permite obtener recubrimientos de baja porosidad y alta calidad.

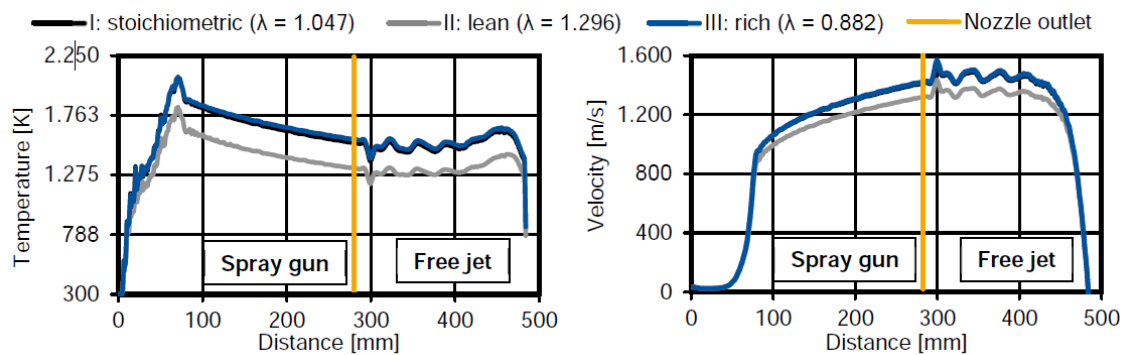
A pesar de estos avances, las modelaciones de HVAF se encuentran aún en sus etapas iniciales, y muchos estudios recurren a simplificaciones del proceso. Los modelos existentes tienden a representar los subprocessos de manera aislada, limitando el análisis detallado de las interacciones entre los diversos fenómenos que ocurren en el proceso real de HVAF. En este contexto, Bobzin et al.[61] propusieron un modelo de simulación más completo de la pistola, que incluye la distribución de aire comprimido a través de la carcasa de la pistola AK07, diseñada enfriar el proceso, y la integración de la cámara de premezcla. Aquí, el aire comprimido y propano se inyectan por separado en la cámara de mezcla, donde ocurre la combustión. Las partículas de polvo CoNiCrAlY se inyectan axialmente utilizando nitrógeno como gas portador.



**Figura 23.** Proceso de mezcla de propano y aire en la cámara de mezcla [61].

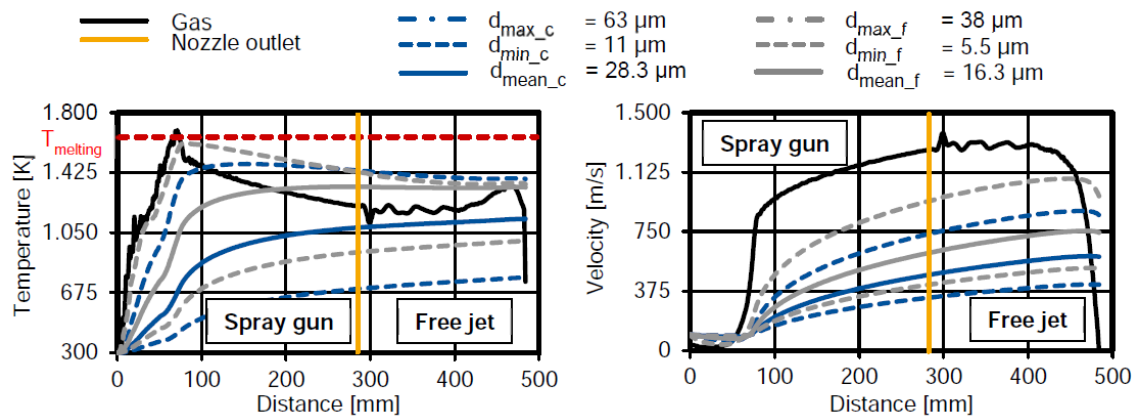
En la figura 23, se observa que el aire comprimido fluye desde la parte superior de la cámara de combustión y se distribuye radialmente en la cámara. Por su parte, el propano se inyecta axialmente en la cámara de combustión y se mezcla con el aire comprimido. Las mediciones indican que la combustión del propano se completa antes de salir de la boquilla. En la figura 24, se registraron temperaturas máximas de 2050K para las mezclas

I y III, mientras que la mezcla II alcanzó los 1900K. Las velocidades del flujo fueron similares en todas las mezclas, destacándose la mezcla II por mantener una temperatura más baja con una velocidad comparable a las otras mezclas. Esto es relevante, ya que el proceso HVAF requiere minimizar la oxidación y la porosidad, haciendo cruciales los parámetros de temperatura y velocidad.



**Figura 24.** Comparación de la temperatura y velocidad del flujo de gas para diferentes mezclas[61].

Finalmente, la figura 25 muestra las velocidades y temperaturas de las partículas de CoNiCrAlY de diferentes tamaños, revelando que las partículas más finas alcanzan mayores velocidades y temperaturas en comparación con las más gruesas. Dado que la temperatura de fusión de polvo CoNiCrAlY es de aproximadamente 1600K, las partículas más gruesas podrían no alcanzar la temperatura adecuada para un recubrimiento eficaz, mientras que las partículas finas, alcanzando un estado parcialmente fundido, podrían resultar en un recubrimiento de mayor calidad.



**Figura 25.** Comparación del vuelo de las partículas de diferentes tamaños en la mezcla II[61].

## 5. Metodología

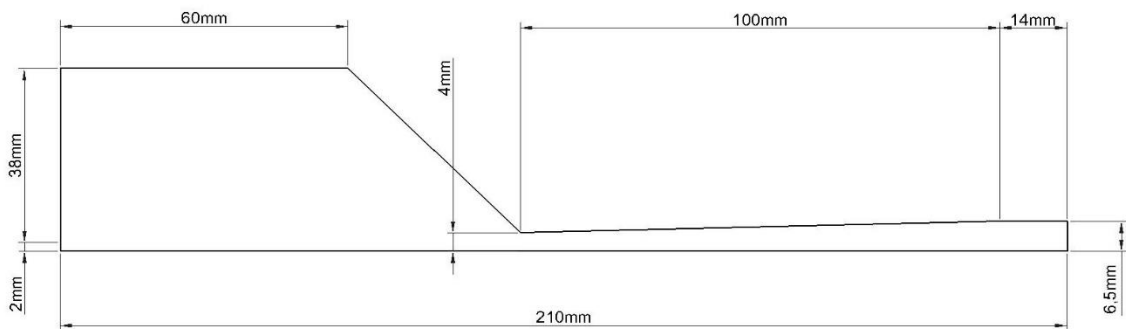
En este estudio, se llevó a cabo una simulación computacional detallada del proceso de combustión en la técnica de pulverización térmica HVAF, utilizando el software ANSYS FLUENT STUDENT 2024 R1. Se selecciona como objeto de estudio la pistola de HVAF modelo AcuKuoote07(AK07) de KERMETICO, que utiliza propano como combustible. La geometría de la pistola, incluyendo la cámara de combustión y la boquilla, se modelan basándose en las especificaciones del fabricante y complementadas por la literatura académica en HVAF. Este estudio incorpora los modelos matemáticos de turbulencia, combustión y transportes de especies disponibles en ANSYS FLUENT STUDENT 2024 R1. Estos modelos son cruciales para aproximar los procesos físicos complejos que ocurren en este proceso de pulverización térmica HVAF, especialmente en situaciones donde las condiciones exactas y las interacciones son demasiado complejas para ser descritas con precisión mediante las ecuaciones fundamentales de la física.

Utilizando FLUENT, se simula el proceso de combustión y el transporte de especies, así como la distribución de las magnitudes físicas tales como la temperatura, presión, velocidad y la composición de la mezcla. Además, el efecto de las reacciones químicas en el campo del flujo de combustión se examina mediante la implementación de dos métodos de reacción química: el método de un paso y el método de dos pasos para la combustión de aire-propano.

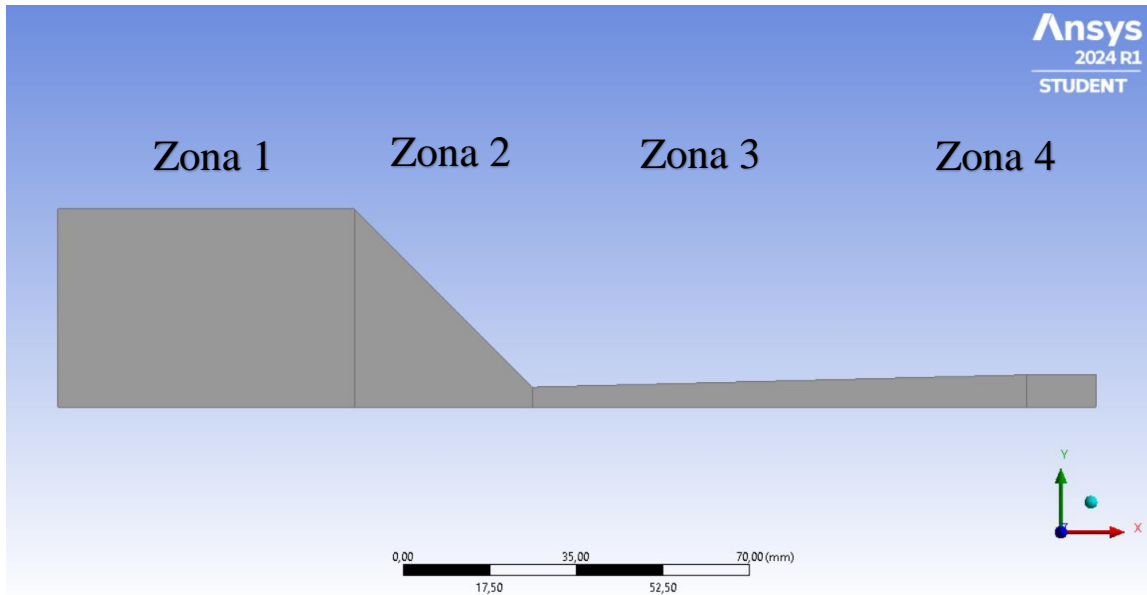
### **5.1 Esquematización de la pistola**

La esquematización de la pistola KERMETICO AK07 se realiza basándose en el estudio de Liu et al. [17]. Utilizamos la herramienta de dibujo *DesignModeler* integrada en ANSYS FLUENT para diseñar la geometría, optando por un enfoque axisimétrico respecto al eje XY. Esta elección se debe a que la geometría de la pistola es simétrica: al dividirla longitudinalmente por la mitad, solo es necesario modelar una mitad, lo que también resulta en un significativo ahorro en los costos computacionales.

El dominio de la geometría de la pistola modelada incluye las entradas para el aire y el combustible, la cámara de mezclado de gases, la cámara de combustión y una boquilla Laval (convergente-divergente). Además, se modela un dominio externo para capturar los efectos del flujo fuera de la pistola. Esta esquematización detallada permite simular los procesos dinámicos tanto dentro como fuera de la pistola HVAF.



**Figura 26.** Esquematación axisimétrica pistola HVOF KERMETICO AK07. Mediante la herramienta *FaceSplit* de ANSYS FLUENT, la geometría de la pistola se ha dividido en cuatro zonas claramente diferenciadas, como se muestra en la figura 22. Cada zona corresponde a una parte específica y funcional de la pistola: la Zona 1 comprende la cámara de mezclado de gases y la cámara de combustión; la Zona 2 abarca la zona divergente de la boquilla Laval; la Zona 3 incluye la zona convergente de la misma boquilla; y la Zona 4 contiene el dominio externo, diseñado específicamente para esta simulación. La división de la geometría en estas zonas claves permite un estudio más detallado y focalizado de los comportamientos de flujo y de las variables en estudio dentro de cada sección. Este enfoque no solo asegura que la simulación sea eficiente, sino también exhaustiva, proporcionando así una base sólida para futuras investigaciones del proceso HVOF.



**Figura 27.** FaceSplit pistola HVAF KERMETICO AK07.

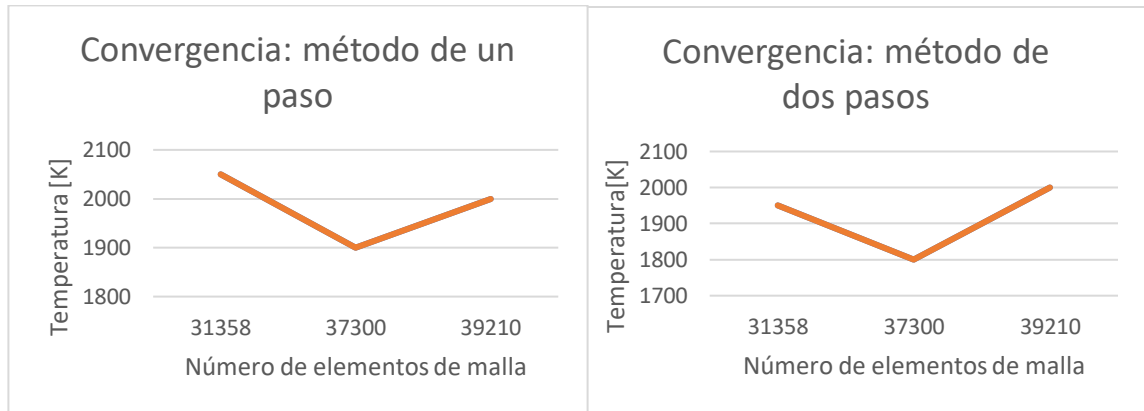
## 5.2 Mallado

Se empleó ANSYS Mesh para generar una malla estructurada que se adapta a la geometría compleja de la pistola HVAF. Dicha malla fue cuidadosamente refinada en áreas donde se esperan altos gradientes de variables críticas como la velocidad, la temperatura y la presión. Este refinamiento se aplicó principalmente en las zonas claves, incluyendo las áreas alrededor de la boquilla y las cámaras de combustión y mezclado de gases. Asimismo, se prestó especial atención al dominio externo, dado su importancia en el análisis del comportamiento del flujo fuera de la pistola.

**TABLA 2***CASOS DE ESTUDIO PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD*

Número de caso	Número de elementos	Tamaño promedio de elemento [mm]	Tamaño promedio de elemento [mm]	Tipo de elementos
1	31358	0.1743	0.1743	Cuadriláteros, triángulos
2	37300	0.1597	0.1597	Cuadriláteros
3	39210	0.1558	0.1558	Cuadriláteros

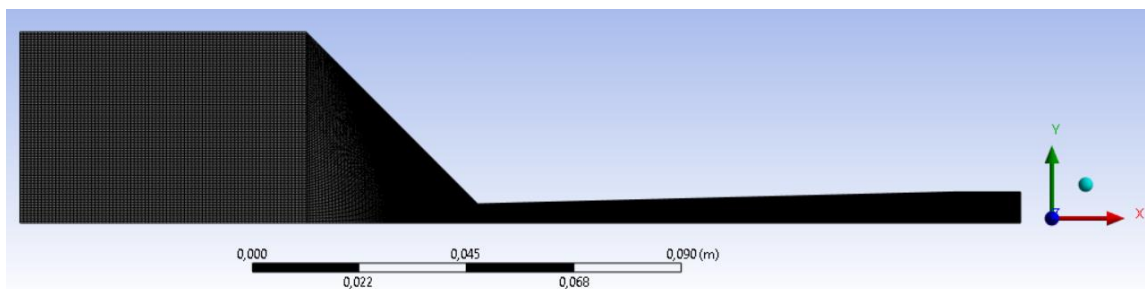
Con el objetivo de validar el escenario de combustión con la mayor precisión posible, se realizó un análisis de sensibilidad con tres casos empleando distintos tamaños de elementos: 0.1743, 0.1597 y 0.1558 mm resultando en 31358, 37300 y 39210 elementos, respectivamente. Los detalles de la configuración de cada caso se presentan en la Tabla 2. Cada malla fue evaluada en ANSYS FLUENT STUDENT 2024 R1 bajo idénticos parámetros de simulación, descritos a lo largo de esta sección, para probar su convergencia y comparar los resultados de temperatura con los datos existentes en la literatura seleccionando el caso que mejor se ajusta a estos.



**Figura 28.** Gráfico de convergencia: método de un paso (a) y método de dos pasos (b).

La figura 28 muestra las diferentes temperaturas obtenidas con el modelo de uno y dos pasos para el sistema de combustión aire-propano. El caso 2, con un tamaño de elemento de 0.1597 mm y 37300 elementos, demostró ser el más efectivo, proporcionando resultados cercanos con los obtenidos en la literatura, que se presentan en la Tabla 5.

Este análisis permitió asegurar que la malla final fuera lo suficientemente detallada para capturar todos los fenómenos físicos relevantes. La visualización de la malla final para la pistola esquematizada se puede observar en la figura 29.



**Figura 29.** Malla generada en pistola HVAF KERMETICO AK07.

### **5.3 Modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos son herramientas esenciales que nos permiten y facilitan la aproximación y el análisis de los complejos procesos intrínsecos a la técnica de pulverización térmica HVAF. Estos modelos proporcionan una representación detallada y precisa de las interacciones dinámicas entre las numerosas variables físicas y químicas presentes.

Siguiendo lo anterior, se seleccionaron y configuraron los modelos matemáticos dentro de ANSYS FLUENT que abordan las distintas características de la dinámica de fluidos en la pistola HVAF. Esto se realiza mediante la activación de los modelos a utilizar en la opción *Models* del panel de *Setup* de ANSYS FLUENT. Cada modelo desempeña un papel específico en el comportamiento del flujo, abarcando desde la turbulencia hasta las reacciones de combustión y turbulencia. En este contexto, se emplea la herramienta *coupled* de ANSYS FLUENT para integrar los modelos de la dinámica de flujo con los modelos de combustión. Este acoplado de modelos nos permite simular de manera coherente y efectiva los procesos, asegurando que las interacciones de flujos de fluidos, la generación de calor y las reacciones químicas sean abordadas de manera integral.

#### **5.3.1 Modelo de energía**

Para estudiar el comportamiento del flujo de fluidos de la pistola HVAF, se utilizaron ecuaciones fundamentales que rigen este proceso. El modelo se configura activando *Energy Equation* en las opciones de *Energy* y *Species Transport* en el de *Species* dentro del panel de *Setup* de ANSYS FLUENT. Las ecuaciones empleadas incluyen la ecuación

de conservación de masa; la ecuación de conservación de momentum; la ecuación de transporte de energía; y la ecuación de transporte de especies, que rastrea la distribución y la reacción de los componentes químicos en el flujo[16], [17]:

- Ecuación de conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Ec. 10})$$

- Ecuación de conservación de momentum

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \quad (\text{Ec. 11})$$

- Ecuación de balance de energía

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\rho u_k \frac{\partial h}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_k \frac{\partial P}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial x_k} \left( \rho D \frac{\partial h}{\partial x_k} \right) + \Phi_D \quad (\text{Ec. 12})$$

- Ecuación de transporte de especies

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho Y_\beta u_i) = -\frac{\partial J_{\beta,i}}{\partial x_i} + R_\beta + S_\beta ; \beta = 1, 2, \dots, N_{sp} - 1 \quad (\text{Ec. 13})$$

### 5.3.2 Modelo de turbulencia

Los modelos de turbulencia son herramientas cruciales para predecir y comprender el comportamiento de los flujos turbulentos, que se caracterizan por presentar remolinos y fluctuaciones de velocidad. Estas características influyen significativamente en el comportamiento del flujo. Para tratar estas complicaciones, se emplea el modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  (por sus siglas en inglés de Re-normalization Group), que es

particularmente efectivo para predecir la viscosidad turbulenta en flujos de alta velocidad y mejorar la precisión de la simulación. La activación de este modelo se realiza en la opción *Viscous model* de *models* del panel de *setup* de ANSYS FLUENT. Este modelo también toma en cuenta la influencia de los vórtices en la turbulencia, lo cual resulta en una mayor precisión en la predicción del flujo vorticial[16], [33]. Las ecuaciones que lo gobiernan son:

- Ecuación de energía cinética turbulenta  $k$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 14})$$

- Tasa de disipación de la energía turbulenta  $\varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Ec. 15})$$

- Viscosidad turbulenta

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 16})$$

Los valores de los parámetros del modelo RNG k- $\varepsilon$  se muestra a continuación:

**TABLA 3**

VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE TURBULENCIA RNG K-E

$C_\mu$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_K$	$\sigma_\varepsilon$
0.0845	1.42	1.68	0.7194	0.7194

### 5.3.3 Modelo de combustión

Para caracterizar la combustión en la pistola HVAF, se utiliza el modelo de disipación de Eddy (EDM, por sus siglas en inglés, Eddy Dissipation Model). Este modelo asume que la tasa de la reacción química supera a la de la mezcla turbulenta, lo que significa que el avance de la reacción depende de la tasa de mezcla entre el combustible y el oxidante[17], [61]. Esto nos permite representar de manera precisa las interacciones entre las especies químicas y la transferencia de energía resultante de la combustión.

En particular, nos centramos en las mezclas de propano-aire, que son el combustible utilizado en la pistola modelada. Analizamos la combustión de estas mezclas a través de dos métodos: el método de un paso y el método de dos pasos para las reacciones químicas. El método de un paso simplifica la reacción química a una sola etapa global, mientras que el método de dos pasos desglosa la reacción en dos fases. La adopción de estos métodos simplificados es esencial para facilitar el estudio de las reacciones químicas entre hidrocarburos y oxígenos, que son muy complejas. Esta complejidad se debe por el gran número de reacciones elementales y a que los productos de combustión pueden descomponerse a alta temperatura y presión debido a la alta vibración químicas en la cámara de combustión[16].

Las ecuaciones de cada método para las reacciones químicas de la combustión propano-aire se muestran a continuación[17]:

- Método de un paso



- Método de dos pasos



Una vez formulado las reacciones químicas, se establecen las entradas para los flujos masicos de combustible y el oxidante, basadas en datos obtenidos de la literatura[17]. Estos flujos se ajustan para optimizar la reacción de combustión, asegurando una mezcla adecuada y eficiente del proceso. Los flujos utilizados se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 4**

*FLUJOS MASICOS DE ENTRADA PARA CADA TIPO DE REACCIÓN QUÍMICA*

Tipo química	reacción	Entrada de flujo másico de aire (kg/s)	Entrada de flujo másico de propano (kg/s)	Flujo másico total (kg/s)
Método de un paso	de un	0.03249	0.00266	0.03515
Método de dos pasos	de dos	0.03265	0.00266	0.03531

## 6. Resultados y discusiones

Esta sección detalla los resultados obtenidos de los modelos computacionales empleados, analizando las implicaciones del modelo de combustión simulado. Dicha evaluación se divide en dos segmentos correspondientes a los enfoques de modelado empleados: el método de un paso y el método de dos pasos. Cada método aporta una perspectiva distinta

sobre la dinámica de la combustión, impactando directamente en la interpretación de fenómeno como la distribución de temperatura, las magnitudes de velocidad y las variaciones de presión a lo largo del flujo de llama. Además, se realizará un análisis comparativo con los datos de temperatura obtenidos de la literatura, que están documentados en la tabla 5.

**TABLA 5**

*TEMPERATURAS DEL FLUJO DE LLAMA OBTENIDAS DE LA LITERATURA*

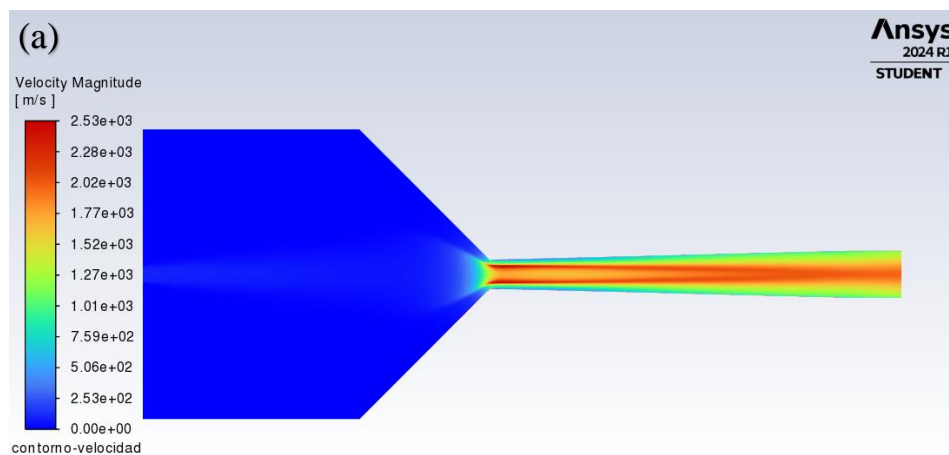
Autores	Temperatura en método de un paso [K]	Temperatura en método de dos pasos [K]
Bobzin et al. [62]	-	1850
Liu et al.[17]	1900	1800
Xing et al. [33]	-	1800
Wu et al. [63]	-	1800

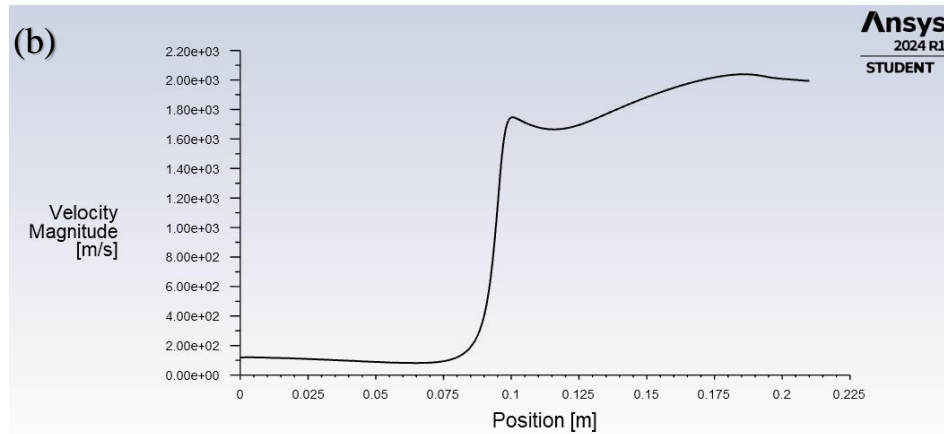
### **6.1 Reacción química método de un paso**

La Figura 30 ilustra el contorno de la velocidad en la pistola HVAF, así como la variación de esta magnitud en función de la distancia. La figura 30.a muestra que, a medida que avanzamos desde la entrada del dominio hacia la salida de la boquilla, se evidencia un incremento significativo en la velocidad: iniciando con tonos azules, que denotan velocidades menores, y que sufre una transición hacia colores rojos y naranjas, que señalan una velocidad mayor. Este cambio es indicativo del calentamiento y la expansión de los gases que ocurren después de la combustión.

La transición del azul a rojo no solo confirma la eficiencia del diseño de la boquilla Laval modelada, sino que también resalta que las velocidades pico se alcanzan en el centro del chorro, una característica esencial para la efectividad del proceso HVOF. Este perfil de velocidad asegura una proyección óptima para las partículas sobre el sustrato, reflejando la capacidad del diseño de la boquilla Laval para acelerar eficientemente las partículas.

Complementariamente, la figura 30.b muestra la variación de la velocidad a lo largo del eje de la pistola, donde la velocidad se mantiene baja y relativamente constante en la parte inicial del dominio, coincidiendo con la información obtenida de la figura 30.a en donde el color azul predomina. Al aproximarnos a 0.125 m, se observa un incremento pronunciado en la velocidad, seguido por un descenso y posterior estabilización. Este patrón sugiera que la aceleración del flujo se focaliza en una zona específica, probablemente donde la actividad de la combustión es máxima, resultando en la expansión de los gases y un incremento de velocidad hacia la salida.



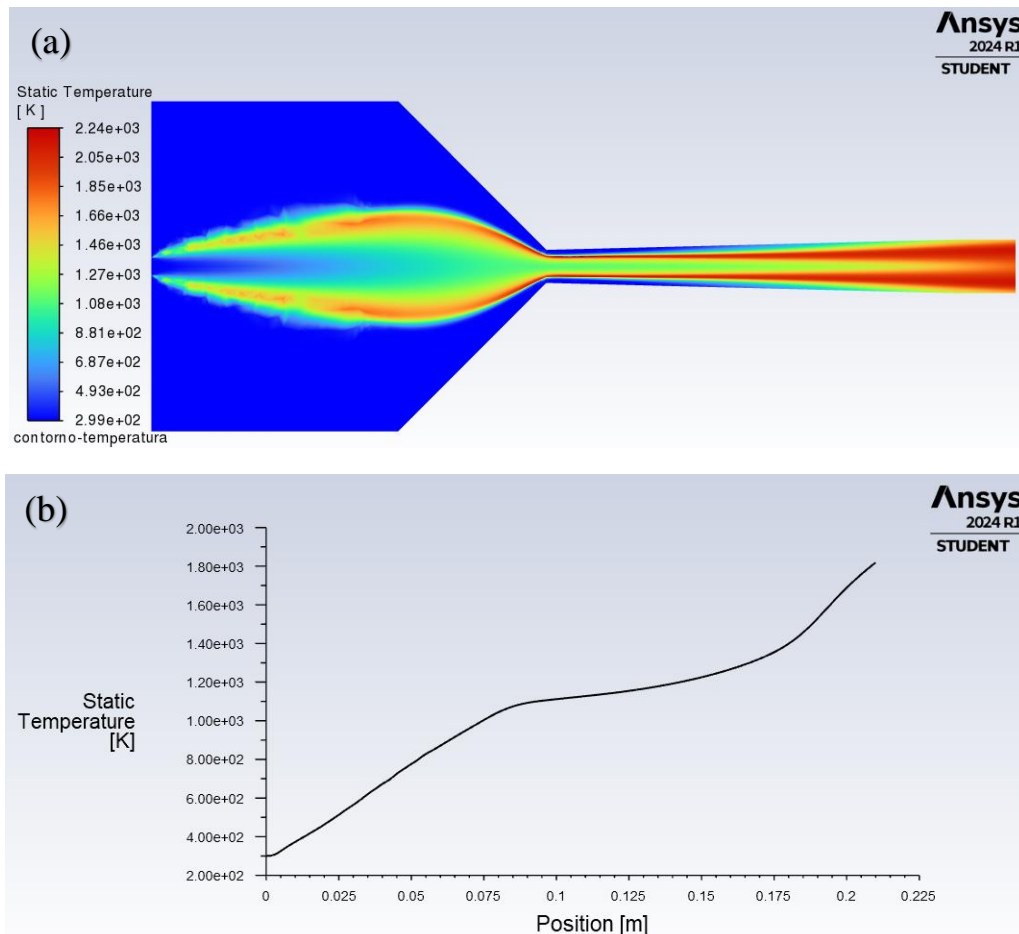


**Figura 30.** Contorno (a) y variación (b) de la velocidad del flujo de combustión en pistola HVAF en el método de un paso.

Por su parte, la figura 31 nos presenta los contornos y la variación de la temperatura dentro de la pistola HVAF. La figura 31.a muestra un gradiente de temperatura que inicia con bajas temperaturas (azul) y avanza hacia altas temperaturas (rojo) en zona donde la combustión es más intensa. El cambio a colores amarillos y rojos indican las áreas de máxima energía térmica liberada debido a la reacción de combustión, con temperaturas cercanas a los 1900 K.

La figura 31.b complementa lo anterior, exhibiendo una curva de temperatura que asciende gradualmente hasta alrededor de 0.125 m, punto en el cual el incremento se vuelve más marcado, coincidiendo con la región de la combustión principal. La temperatura alcanza su pico en este punto, aproximándose a los 1900 K, reflejando la intensidad del proceso de combustión y el efectivo calentamiento del flujo.

Esta temperatura de 1900K obtenida para el método de un paso coincide con los datos obtenidos por Liu et al. usando el mismo método, como se muestra en la tabla 5 en la sección inicial de resultados y discusiones.

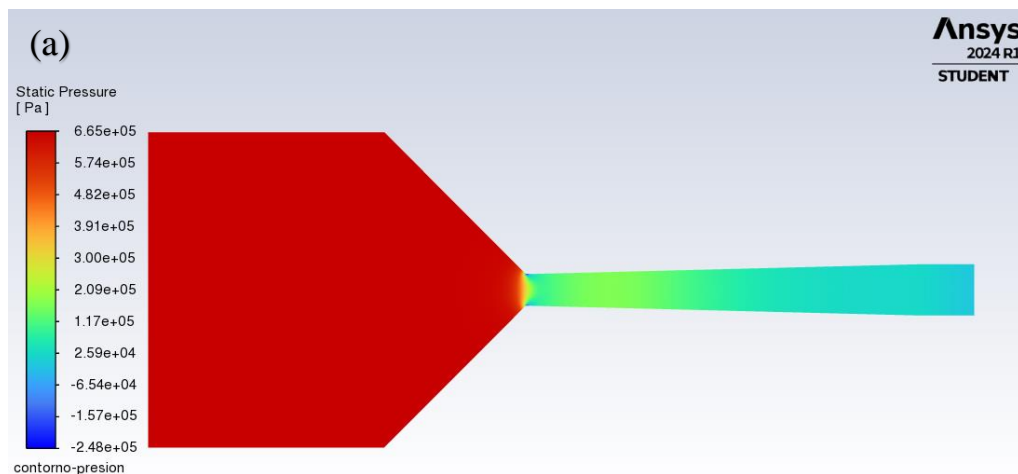


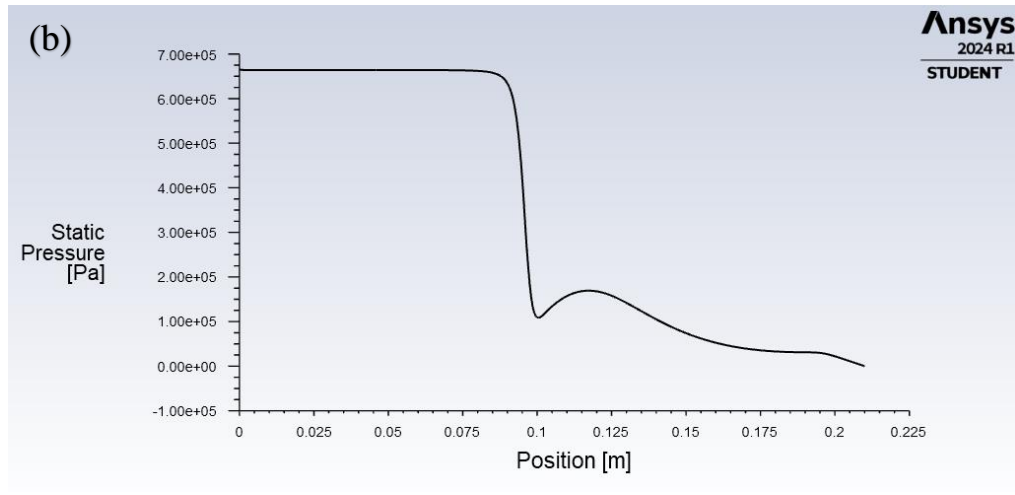
**Figura 31.** Contorno (a) y variación (b) de temperatura en pistola HVAF en el método de un paso.

La figura 32 nos muestra el contorno de presión y la variación de esta en la pistola HVAF. En la figura 32.a, observamos una alta presión en el inicio del dominio y en la cámara de combustión, identificada por los colores rojos, lo cual se asocia directamente con la combustión del propano con el aire. Al avanzar hacia la boquilla, se evidencia una

disminución de la presión, representada por la transición de colores verdes y azules. Esta tendencia decreciente es reflejo de la expansión de los gases y la aceleración del flujo resultante de la combustión, comportamientos que son tanto esperados como beneficiosos para el funcionamiento óptimo de la pistola HVAF.

Por su parte, la figura 32.b muestra que la presión se mantiene alta y estable al inicio del dominio, pero experimenta una reducción abrupta alrededor de los 0.1 m, punto que corresponde a la transición de la sección convergente a la sección divergente de la boquilla, provocando así la aceleración del flujo. Mas allá de esta zona, la presión decrece y se estabiliza. Esta observación corrobora que la boquilla Laval con su sección divergente y convergente, efectivamente consigue el efecto de Venturi deseado.



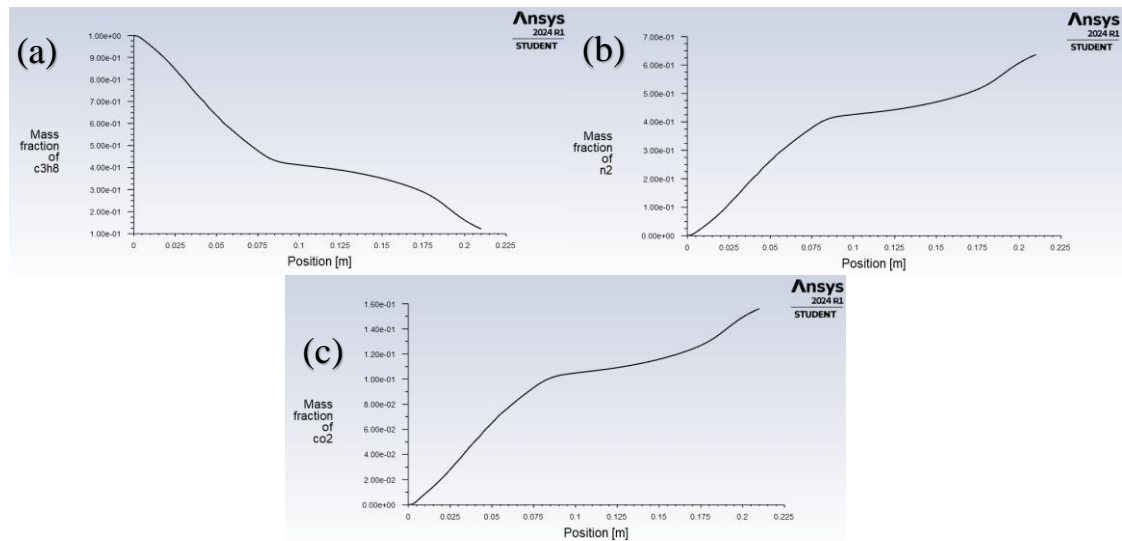


**Figura 32.** Contorno (a) y variación (b) de presión en pistola HVAF en el método de un paso.

La figura 33 nos presenta detalladamente la fracción de masa de propano ( $C_3H_8$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a lo largo de la pistola HVAF, facilitada por el análisis de transporte de especies. En el gráfico del propano (a), observamos una disminución progresiva de su fracción de masa, una tendencia que refleja su consumo durante la combustión para generar energía y otros productos, descendiendo hasta valores cercanos a cero.

En cuanto al nitrógeno (b), se aprecia un incremento en su concentración a lo largo de la pistola. Aunque el nitrógeno no interviene en la combustión del propano, su aumento puede atribuirse tanto a la disminución de otros componentes combustibles como a su entrada desde el entorno exterior del dominio de la pistola. Este enriquecimiento de nitrógeno es ventajoso para el proceso, dado que facilita el transporte de los polvos que serán pulverizados.

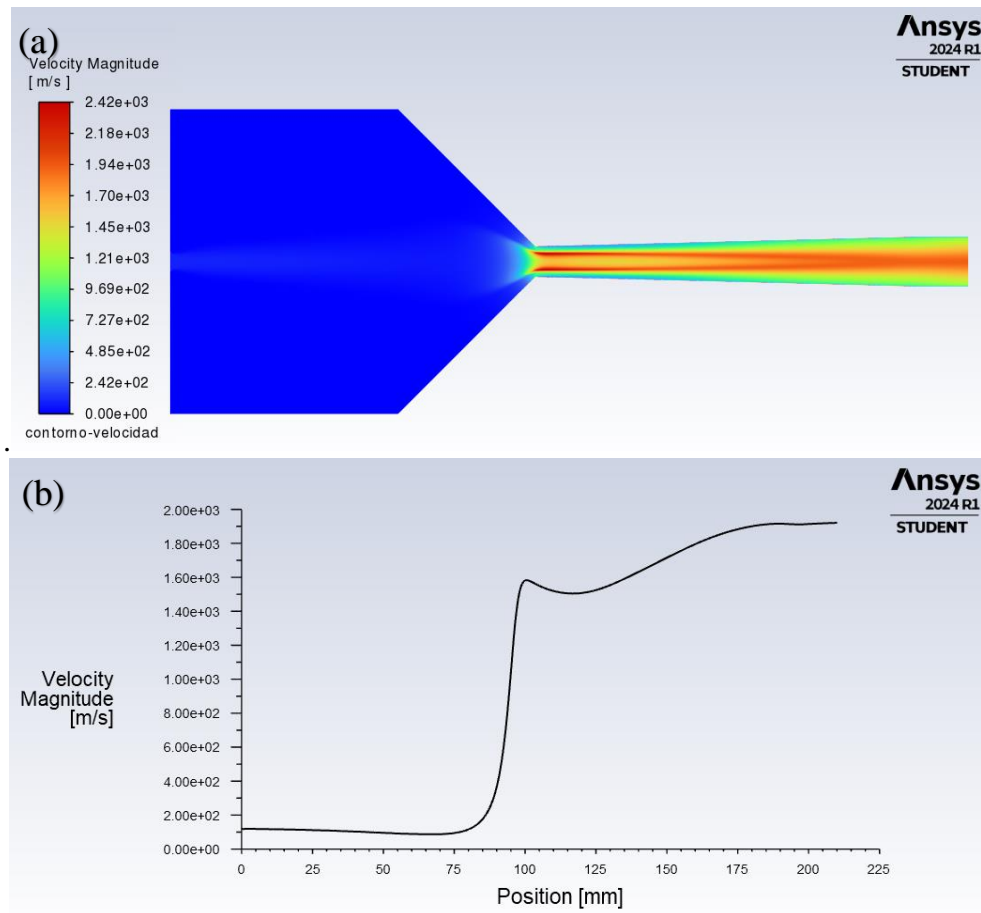
Finalmente, la fracción de masa del dióxido de carbono (c) exhibe un aumento a lo largo de la pistola, sirviendo como un indicativo fiable de la combustión del propano, ya que el CO<sub>2</sub> es uno de los principales productos resultantes. Este patrón nos confirma que la combustión está teniendo lugar como se espera.



**Figura 33.** Variación de la fracción molar de propano (a), nitrógeno (b) y dióxido de carbono (c) a lo largo del dominio de la pistola HVAF en el método de un paso.

## 6.2 Reacción química método de dos pasos

La figura 34 nos ofrece una visualización del contorno de velocidad y la variación a lo largo de la pistola HVAF. La figura 34.a, se observa que la velocidad es baja al inicio del dominio (azul), un estado típico previo a la combustión, y aumenta significativamente hacia la salida de la boquilla, donde los colores rojo y naranja denotan velocidades elevadas. Esta aceleración del flujo es fundamental en el proceso HVAF, ya que asegura una proyección térmica eficaz de las partículas sobre el sustrato.



**Figura 34.** Contorno (a) y variación (b) de velocidad en pistola HVAF en el método de dos pasos.

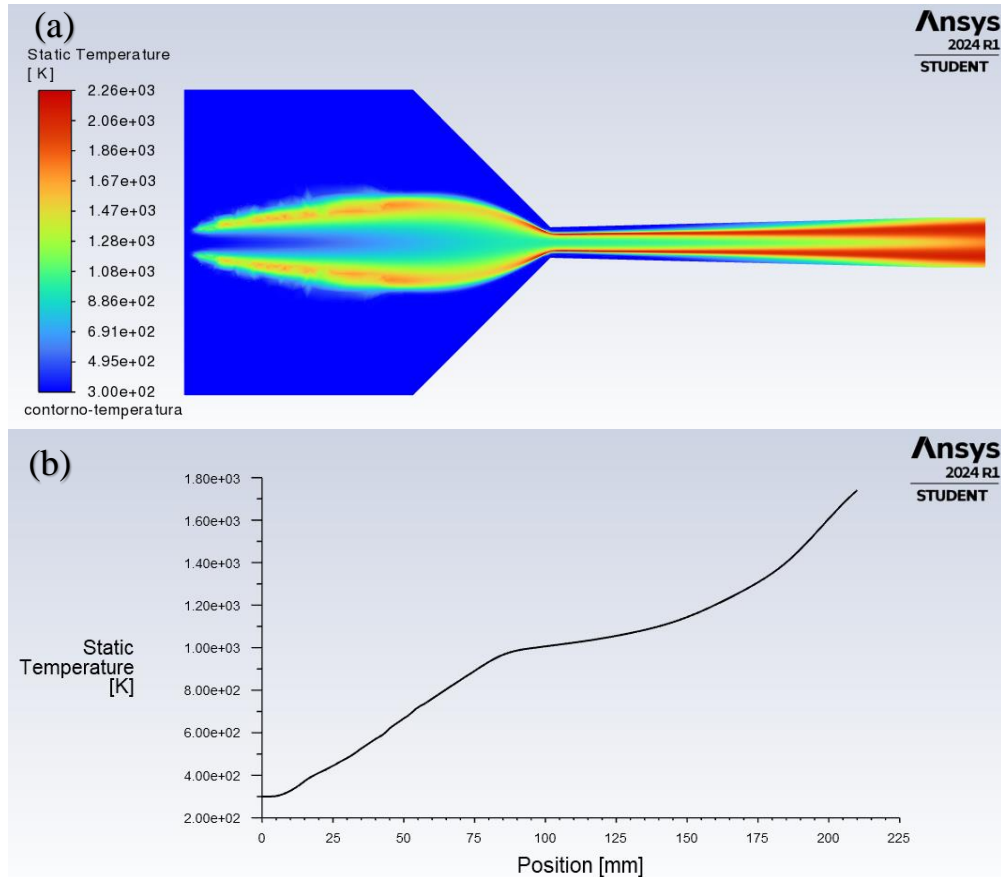
Por su parte, la figura 34.b muestra que la velocidad se mantiene baja y estable en las proximidades del inicio del dominio, incrementándose drásticamente alrededor de los 0.1 m. Este cambio se alinea con la expansión térmica y la aceleración de los gases, lo que indica que la boquilla está óptimamente diseñada para maximizar la velocidad del flujo precisamente en esta región. Es notable el incremento de la velocidad en el centro de la pistola, lo cual es beneficioso para la pulverización y mejora la calidad del recubrimiento aplicado. Además, este aumento en la velocidad central del chorro sugiere un flujo óptimo, crucial para la eficiencia y uniformidad del proceso de recubrimiento HVAF.

La figura 35 ilustra el contorno de temperatura y su variación a lo largo de la pistola HVOF. En la figura 35.a, el contorno muestra un gradiente térmico que comienza con temperaturas más bajas (azul) en la entrada del dominio y se intensifica hacia temperaturas más altas (rojo) en la salida, alcanzado aproximadamente 1800 K. En la zona de cambio de sección convergente a divergente de la boquilla, la temperatura se incrementa progresivamente en el centro de la pistola y se estabiliza conforme nos desplazamos a lo largo de ella, condición favorable para el proceso de recubrimiento HVOF.

Por su parte, la figura 35.b muestra un perfil de temperatura que inicialmente asciende de forma gradual y luego exhibe un aumento más marcado alrededor de los 0.125 m. Este punto específico puede ser indicativo de una combustión intensificada, que logra una liberación de energía térmica alta para calentar las partículas antes de su deposición y garantizar la calidad del recubrimiento final.

Los picos de temperatura de 1800K alcanzados en el método de dos pasos son consistentes con los valores reportados en la literatura, como se muestra en la tabla 5. Sin embargo, se observa una ligera discrepancia respecto a los datos reportados por Bobzin et al., aunque esta diferencia se encuentra dentro de un margen de error aceptable (menor al 5%). Esta variación podría deberse a diferencias en las condiciones experimentales o en los ajustes de modelización, especialmente considerando que el estudio de Bobzin et al. abarca una simulación más completa de la pistola KERMETICO AK07, que incluye la distribución de aire comprimido a través de la carcasa de la pistola, diseñada enfriar el proceso, y la

integración de la cámara de mezcla en la cámara de combustión y un precalentamiento de los gases.



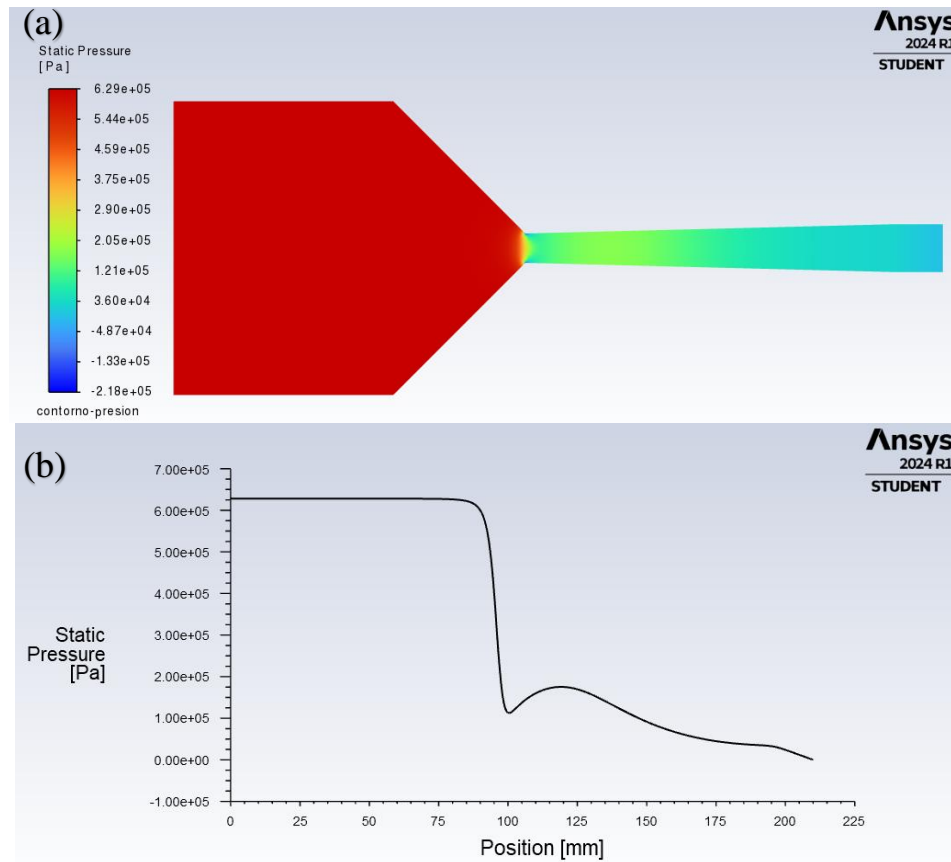
**Figura 35.** Contorno (a) y variación (b) de temperatura en pistola HVOF en el método de dos pasos.

La figura 36 ilustra el contorno de presión y su variación a lo largo de la pistola HVOF. En la figura 36.a, se observa una alta presión en la cámara de combustión y al inicio del dominio (colores rojos), lo cual es esperable debido a la combustión del propano con el aire. Al avanzar a través de la boquilla, la presión disminuye significativamente, lo que señala la expansión de los gases y la aceleración del flujo resultante de la combustión.

Este efecto es característico y necesario en las pistolas HVAF para garantizar la adecuada velocidad de las partículas.

De la misma forma, la figura 36.b muestra que la presión es alta y relativamente constante al inicio, y luego experimenta una caída abrupta cerca de los 0.1 m, ubicación que corresponde al cambio de la boquilla de una sección convergente a una divergente. Esta transición es fundamental para la aceleración del flujo. Mas allá de este punto, la presión continúa disminuyendo hasta estabilizarse. La eficacia de este diseño de boquilla evidencia un aprovechamiento óptimo del efecto Venturi, crucial para el proceso HVAF.

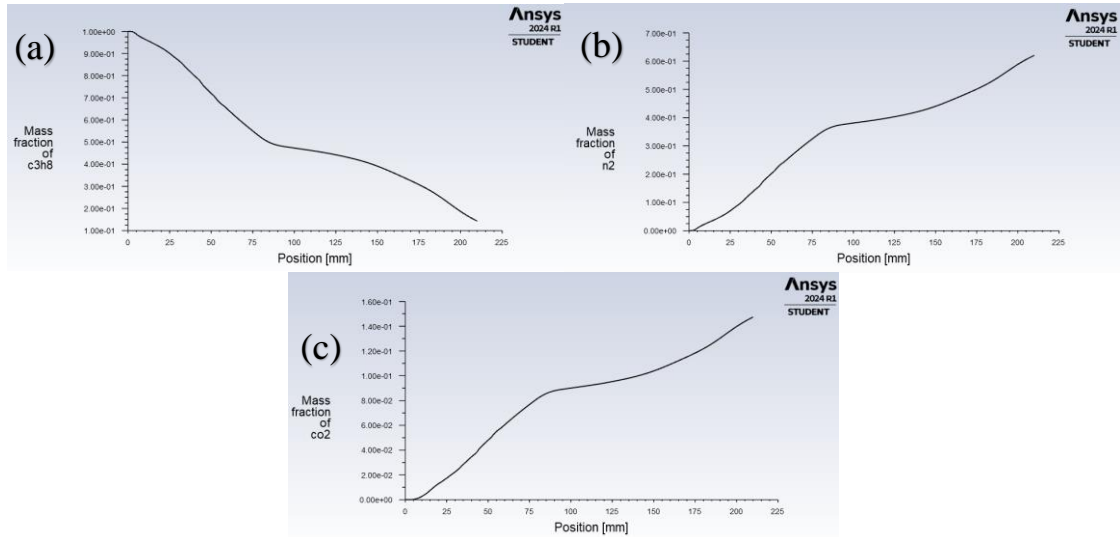
La figura 37 nos ofrece un análisis detallado de la fracción de masa de propano ( $C_3H_8$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a lo largo de la pistola HVAF, obtenido a través de un estudio de transporte de especies. El gráfico del propano (a) revela una disminución progresiva de su fracción de masa desde el inicio hasta la salida del dominio, reflejando la combustión del propano que se consume para generar la energía y los productos típicos de combustión.



**Figura 36.** Contorno (a) y variación (b) de presión en pistola HVAF en el método de dos pasos.

En cuanto al nitrógeno (b), observamos un aumento constante en su fracción de masa a lo largo de la pistola. Este aumento puede atribuirse a la reducción de las especies combustibles como al propano y a la incorporación de nitrógeno del aire circundante. Este fenómeno es favorable, ya que el nitrógeno actúa como un gas de arrastre para los polvos en el proceso de pulverización.

Finalmente, el dióxido de carbono (c) muestra un aumento en la fracción de masa a lo largo de la pistola, siendo este un indicador claro de la combustión en curso. Su incremento sostenido confirma que la reacción de combustión está ocurriendo como se espera.



**Figura 37.** Variación de la fracción molar de propano (a), nitrógeno (b) y dióxido de carbono (c) a lo largo del dominio de la pistola HVOF en el método de dos pasos.

## 7. Conclusiones

En este estudio, se desarrolló un modelo bidimensional de la combustión en la técnica HVAF empleando la pistola KERMETICO AK07 como referencia. Se evaluó la influencia de dos métodos diferentes de reacción química en el comportamiento del modelo de combustión. Los hallazgos claves de este estudio se resumen a continuación:

- La consistencia en el aumento de temperatura y el efecto Venturi, apreciable en las variaciones de presión y velocidad observadas en los contornos y gráficos, sugiere que el diseño de la pistola es altamente eficiente, lo que valida su aplicación en estudios de HVAF.
- La disminución de la fracción de masa de propano y el correspondiente aumento de dióxido de carbono a lo largo del dominio de la pistola confirman la validez del modelo de combustión utilizado, demostrando que la reacción progresa según lo previsto en ambos métodos analizados.
- Las temperaturas obtenidas para ambos métodos están en concordancia con los datos reportados en la literatura: 1900K para el método de un paso y 1800K para el método de dos pasos.
- El método de dos pasos para la reacción química ofrece resultados más precisos y realistas en comparación con el método de un paso, lo que lo convierte en la opción óptima para futuros estudios que busquen una representación más exacta de las condiciones reales.

- El aumento en la fracción de masa de nitrógeno y la disminución en la de propano resaltan la compleja interacción entre las especies químicas y la dinámica de flujos. Estos factores deber ser cuidadosamente controlados para mantener la eficacia del proceso.

## 8. Referencias

- [1] P. S. Babu, Y. Madhavi, L. R. Krishna, G. Sivakumar, D. S. Rao, and G. Padmanabham, "Thermal Spray Coatings for Erosion–Corrosion Resistant Applications," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, no. 9. Springer, pp. 2141–2159, Sep. 01, 2020. doi: 10.1007/s12666-020-02053-0.
- [2] L. M. Berger, "Application of hardmetals as thermal spray coatings," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 49, no. 1, pp. 350–364, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2014.09.029.
- [3] B. Q. Wang, "Erosion-corrosion of coatings by biomass-fired boiler fly ash," *Wear*, vol. 188, no. 1–2, pp. 40–48, Sep. 1995, doi: 10.1016/0043-1648(95)06598-9.
- [4] R. K. Kumar, M. Kamaraj, S. Seetharamu, T. Pramod, and P. Sampathkumaran, "Effect of Spray Particle Velocity on Cavitation Erosion Resistance Characteristics of HVOF and HVOF Processed 86WC-10Co4Cr Hydro Turbine Coatings," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 1217–1230, Aug. 2016, doi: 10.1007/s11666-016-0427-3.
- [5] Generadoras de Chile, "Generación Eléctrica en Chile." Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- [6] 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.
- [7] J.-Q. Li and M. M. Moe Saw, "Fatigue Analysis of Simple and Advanced Hoop Pelton Turbine Buckets," *American Scientific Research Journal for Engineering*, 2017, [Online]. Available: <http://asrjetsjournal.org/>
- [8] A. K. Rai, A. Kumar, and T. Staubli, "Analytical modelling and mechanism of hydro-abrasive erosion in pelton buckets," *Wear*, vol. 436–437, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.203003.
- [9] J. A. R. Wesmann and N. Espallargas, "Effect of atmosphere, temperature and carbide size on the sliding friction of self-mated HVOF WC-CoCr contacts," *Tribol Int*, vol. 101, pp. 301–313, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.04.032.
- [10] Yunfei Qiao, YouRong Liu, and Traugott E. Fischer, "Sliding and abrasive wear resistance of thermal-sprayed WC-CO coatings," Jan. 2000.

- [11] A. Milanti, V. Matikainen, H. Koivuluoto, G. Bolelli, L. Lusvarghi, and P. Vuoristo, "Effect of spraying parameters on the microstructural and corrosion properties of HVOF-sprayed Fe–Cr–Ni–B–C coatings," *Surf Coat Technol*, vol. 277, pp. 81–90, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2015.07.018.
- [12] S. L. Liu, X. P. Zheng, and G. Q. Geng, "Influence of nano-WC-12Co powder addition in WC-10Co-4Cr AC-HVOF sprayed coatings on wear and erosion behaviour," *Wear*, vol. 269, no. 5–6, pp. 362–367, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.wear.2010.04.019.
- [13] J. Pan, S. Hu, L. Yang, K. Ding, and B. Ma, "Numerical analysis of flame and particle behavior in an HVOF thermal spray process," *Mater Des*, vol. 96, pp. 370–376, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.008.
- [14] M. Jadidi, A. Z. Yeganeh, and A. Dolatabadi, "Numerical Study of Suspension HVOF Spray and Particle Behavior Near Flat and Cylindrical Substrates," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 27, no. 1–2, pp. 59–72, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11666-017-0656-0.
- [15] X. Yuan, H. Wang, G. Hou, and B. Zha, "Numerical modeling of a low temperature high velocity air fuel spraying process with injection of liquid and metal particles," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 413–421, Sep. 2006. doi: 10.1361/105996306X124428.
- [16] H. R. Jiang *et al.*, "Numerical Investigation of In-Flight Behavior of Fe-Based Amorphous Alloy Particles in AC-HVOF Thermal Spray Process," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 1146–1159, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11666-019-00889-7.
- [17] F. Liu, Z. Li, M. Fang, and H. Hou, "Numerical analysis of the activated combustion high-velocity air-fuel spraying process: A three-dimensional simulation with improved gas mixing and combustion mode," *Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1–15, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14030657.
- [18] P. Vuoristo, "Thermal Spray Coating Processes," in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 4, Elsevier Ltd, 2014, pp. 229–276. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00407-6.
- [19] ASM international and the thermal spray society, "Introduction to thermal spray processing," in *HandBook of thermal spray technology*, J.R. Davis, Ed., 2004, pp. 3–13.

- [20] M. F. Smith, "Comparing cold spray with thermal spray coating technologies," *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*, pp. 43–61, Jan. 2007, doi: 10.1533/9781845693787.1.43.
- [21] S. Sampath, "Thermal spray applications in electronics and sensors: Past, present, and future," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 921–949, Sep. 2010, doi: 10.1007/s11666-010-9475-2.
- [22] N. Espallargas, "Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, Manufacture and Applications," pp. 229–276, Jan. 2015.
- [23] P. Fauchais, J. Heberlein, and M. Boulos, "Overview of Thermal Spray," 2014, pp. 17–72. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3\_2.
- [24] P. Fauchais, J. Heberlein, and M. Boulos, "Powders, Wires, Cords, and Rods," 2014, pp. 675–754. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3\_11.
- [25] Z. Song and H. Li, "Plasma Spraying with Wire Feeding: A Facile Route to Enhance the Coating/Substrate Interfacial Metallurgical Bonding," *Coatings*, vol. 12, p. 615, Apr. 2022, doi: 10.3390/coatings12050615.
- [26] V. Kukareko, A. Byeli, M. Belotserkovskii, and A. Grigorichik, "Effect of ion-beam nitriding on structure, phase state, and tribological behavior of efficient thermal spray coatings deposited from various classes of rod steels," *Journal of Friction and Wear*, vol. 34, Nov. 2013, doi: 10.3103/S1068366613060093.
- [27] E. Sadeghimeresht, N. Markocsan, and P. Nylén, "A comparative study of corrosion resistance for HVOF-sprayed Fe- and Co-based coatings," *Coatings*, vol. 6, no. 2, Jun. 2016, doi: 10.3390/coatings6020016.
- [28] M. M. Verdian, "3.13 Finishing and Post-Treatment of Thermal Spray Coatings," *Comprehensive Materials Finishing*, vol. 3–3, pp. 191–206, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09200-6.
- [29] Y. Y. Avcu, M. Guney, and E. Avcu, "High-velocity air fuel coatings for steel for erosion-resistant applications," *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 13, no. 2. International Association of Physical Chemists, pp. 407–420, Mar. 01, 2023. doi: 10.5599/jese.1369.
- [30] Q. Wang, S. Zhang, Y. Cheng, J. Xiang, X. Zhao, and G. Yang, "Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVOF spraying processes," *Surf Coat Technol*, vol. 218, no. 1, pp. 127–136, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.041.

- [31] L. Jacobs, M. M. Hyland, and M. De Bonte, "Comparative Study of WC-Cermet Coatings Sprayed via the HVOF and the HVOF Process," 1997.
- [32] Kermetico INC., "Multi-Purpose HVOF AK Systems," 2017. [Online]. Available: [www.kermetico.com](http://www.kermetico.com)
- [33] X. Gao, C. Li, D. Zhang, H. Gao, and X. Han, "Numerical analysis of the activated combustion high-velocity air-fuel (AC-HVOF) thermal spray process: A survey on the parameters of operation and nozzle geometry," *Surf Coat Technol*, vol. 405, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126588.
- [34] A. Fayyaz, N. Muhamad, A. B. Sulong, J. Rajabi, and Y. N. Wong, "Fabrication of cemented tungsten carbide components by micro-powder injection moulding," *J Mater Process Technol*, vol. 214, no. 7, pp. 1436–1444, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2014.02.006.
- [35] R. He, J. Wang, M. He, H. Yang, and J. Ruan, "Synthesis of WC composite powder with nano-cobalt coatings and its application in WC-4Co cemented carbide," *Ceram Int*, vol. 44, no. 9, pp. 10961–10967, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2018.03.174.
- [36] J. Pötschke, T. Säuberlich, A. Vornberger, and J. A. Meese-Marktscheffel, "Solid state sintered nanoscaled hardmetals and their properties," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 72, pp. 45–50, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2017.12.008.
- [37] C. B. Wei *et al.*, "Microstructure and properties of ultrafine cemented carbides—Differences in spark plasma sintering and sinter-HIP," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 552, pp. 427–433, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.MSEA.2012.05.065.
- [38] C. Chen, Z. Guo, S. Li, Y. Xiao, B. Chai, and J. Liu, "Microstructure and properties of WC-17Co cermets prepared using different processing routes," *Ceram Int*, vol. 45, no. 7, pp. 9203–9210, May 2019, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2019.01.265.
- [39] K. Torkashvand, M. Gupta, S. Björklund, F. Marra, L. Baiamonte, and S. Joshi, "Influence of nozzle configuration and particle size on characteristics and sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings," *Surf Coat Technol*, vol. 423, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127585.
- [40] C. Li, X. Gao, D. Zhang, H. Gao, X. Han, and B. Zhang, "Numerical Investigation on the Flame Characteristics and Particle Behaviors in a HVOF Spray Process Using Kerosene as Fuel," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 725–738, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11666-021-01165-3.

- [41] M. Xiao *et al.*, "Effects of Particle Size on the Microstructure and Mechanical Properties of HVAF-Sprayed Al-Based Quasicrystalline Coatings," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 30, no. 5. Springer, pp. 1380–1392, Jun. 01, 2021. doi: 10.1007/s11666-021-01202-1.
- [42] T. Varis, T. Suhonen, M. Jokipii, and P. Vuoristo, "Influence of powder properties on residual stresses formed in high-pressure liquid fuel HVOF sprayed WC-CoCr coatings," *Surf Coat Technol*, vol. 388, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125604.
- [43] P. H. Gao, Y. G. Li, C. J. Li, G. J. Yang, and C. X. Li, "Influence of powder porous structure on the deposition behavior of cold-sprayed WC-12Co coatings," in *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, pp. 742–749. doi: 10.1007/s11666-008-9258-1.
- [44] G. Liang, C. Zhou, and Y. Liu, "Critical Velocity Prediction and Characterization of Bonding Types of High-Velocity, Air-Fuel-Sprayed Titanium Coating on Aluminum Alloys," *Coatings*, vol. 12, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/coatings12020234.
- [45] G. Bolelli *et al.*, "Tribology of HVOF- and HVAF-sprayed WC–10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment," *Surf Coat Technol*, vol. 265, pp. 125–144, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2015.01.048.
- [46] K. Torkashvand *et al.*, "Tribological behavior of HVAF-sprayed WC-based coatings with alternative binders," *Surf Coat Technol*, vol. 436, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128296.
- [47] C. Lyphout *et al.*, "Tribological Properties of Hard Metal Coatings Sprayed by High-Velocity Air Fuel Process," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25, no. 1–2, pp. 331–345, Jan. 2016, doi: 10.1007/s11666-015-0285-4.
- [48] H. Saito, A. Iwabuchi, and T. Shimizu, "Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide," *Wear*, vol. 261, no. 2, pp. 126–132, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.WEAR.2005.09.034.
- [49] K. Torkashvand, V. K. Selpol, M. Gupta, and S. Joshi, "Influence of test conditions on sliding wear performance of high velocity air fuel-sprayed wc–cocr coatings," *Materials*, vol. 14, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/ma14113074.
- [50] K. Fan *et al.*, "Influence of WC Particle Size on the Mechanical Properties and Residual Stress of HVOF Thermally Sprayed WC–10Co–4Cr Coatings," *Materials*, vol. 15, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/ma15165537.

- [51] J. Wang and Z. Zhang, "Thermal deformation strengthening of WC-10Co4Cr coating prepared by high velocity air-fule process," *Mater Res Express*, vol. 7, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab7fc4.
- [52] H. Jiang, X. Zhao, H. Song, and C. Li, "The Effect of High-Velocity Air-Fuel WC-12Co Coatings on the Wear and Corrosion Resistance of TC18 Titanium Alloy," *Coatings*, vol. 13, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/coatings13040755.
- [53] Linqip Team, "Impulse Turbine: Working Principle, Components, and Types." [Online]. Available: <https://www.linqip.com/blog/impulse-turbine-working-principle/>
- [54] J. Erazo, G. Barragan, M. Pérez-Sánchez, C. Tapia, M. Calahorrano, and V. Hidalgo, "Geometrical Optimization of Pelton Turbine Buckets for Enhancing Overall Efficiency by Using a Parametric Model—A Case Study: Hydroelectric Power Plant 'Illuchi N2' from Ecuador," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15239052.
- [55] A. Y. Del Comportamiento Hidráulico Mecánico De La Turbina and M. Modelos, "2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA PELTON PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA, CAPACIDAD 2 KW."
- [56] P. P. Gohil and R. P. Saini, "Coalesced effect of cavitation and silt erosion in hydro turbines - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33. Elsevier Ltd, pp. 280–289, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.075.
- [57] B. Thapa, O. G. Dahlhaug, P. Chaudhary, O. G. Dahlhaug, and P. Upadhyay, "Study of Combined Effect of Sand Erosion and Cavitation in Hydraulic Turbines," 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/240622577>
- [58] G. Ji, M. Zhang, Y. Lu, and J. Dong, "The Basic Theory of CFD Governing Equations and the Numerical Solution Methods for Reactive Flows," in *Computational Fluid Dynamics*, G. Ji and J. Dong, Eds., Rijeka: IntechOpen, 2023, p. Ch. 1. doi: 10.5772/intechopen.113253.
- [59] F. Menter, R. Sechner, A. A. Germany GmbH Matyushenko, and S. Petersburg, "Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD."
- [60] P. Gustavo and R. Navarro, "Modelos de turbulencia introductorio."
- [61] K. Bobzin, H. Heinemann, and K. Jasutyn, "Correlation Between Process Parameters and Particle In-Flight Behavior in AC-HVAF," in *Thermal Spray 2022: Proceedings from*

*the International Thermal Spray Conference*, DVS Media GmbH, May 2022, pp. 984–989. doi: 10.31399/asm.cp.itsc2022p0984.

- [62] K. Bobzin, H. Heinemann, and K. Jasutyn, “Numerical and Experimental Investigation for Application of CoNiCrAlY Coatings by HVOF,” *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, doi: 10.1007/s11666-024-01722-6.
- [63] N. Wu, T. Li, and J. Lian, “NUMERICAL INVESTIGATION OF HVOF-SPRAYED Fe-BASED AMORPHOUS COATINGS,” *Materiali in tehnologije*, vol. 56, no. 6, Dec. 2022, doi: 10.17222/mit.2022.636.
- [64] X. Gao, C. Li, Y. Xu, X. Chen, and X. Han, “Effects of Fuel Types and Process Parameters on the Performance of an Activated Combustion High Velocity Air-Fuel (AC-HVOF) Thermal Spray System,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 30, no. 7. Springer, pp. 1875–1890, Oct. 01, 2021. doi: 10.1007/s11666-021-01250-7.