

FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL EN GEOMETRÍAS IDEALES DE FONTAN

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN IDEAL FONTAN GEOMETRIES

Juan F. Vallejo Greca^a, William I. Machaca Abregú^{a,b}, Néstor R. Cejas Bolecek^a, Mauro Fermin^a y Enzo A. Dari^{a,b}

^aComisión Nacional de Energía Atómica, Av. Bustillo 9500, 8400 S. C. de Bariloche, Argentina, juanvallejo@cnea.gob.ar, <https://www.argentina.gob.ar/cnea>

^bInstituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Av. Bustillo 9500, 8400 S. C. de Bariloche, Argentina, <https://www.ib.edu.ar>

Palabras clave: Hemodinámica, cardiopatología, OpenFOAM, Pérdida de Potencia, Fontan.

Resumen. El estadio Fontan es el último de una posible serie de intervenciones quirúrgicas realizadas en pacientes pediátricos con cardiopatías congénitas complejas, como el de fisiología univentricular. El objetivo de esta serie de cirugías es lograr desviar la totalidad del retorno venoso sistémico a oxigenarse en los pulmones, evitando su flujo a través del ventrículo no funcional. El paso para concretarlo consiste en desviar el flujo sanguíneo de la vena cava inferior y/o venas suprahepáticas hacia las ramas pulmonares. Este trabajo presenta resultados preliminares de un estudio sistemático realizado en geometrías ideales de Fontan aplicando diferentes condiciones de caudal. En particular, estudia cantidades de interés como la pérdida de energía con el objetivo de contrastar con trabajos experimentales e identificar casos que permitan optimizar el diseño de la cirugía según valores hemodinámicos establecidos.

Keywords: Hemodynamics, cardiopathology, OpenFOAM, Power Loss, Fontan.

Abstract. The Fontan stage is the last of a possible series of surgical interventions performed in pediatric patients with complex congenital heart disease, such as univentricular physiology. The objective of this series of surgeries is to divert the entire systemic venous return to oxygenation in the lungs, avoiding its flow through the non-functional ventricle. The step to achieve this consists of diverting the blood flow from the inferior vena cava and/or suprahepatic veins towards the pulmonary branches. This paper presents preliminary results of a systematic study carried out on ideal Fontan geometries applying different flow conditions. In particular, it studies quantities of interest such as loss of energy in order to contrast with experimental work and identify cases that allow optimizing the design of surgery according to established hemodynamic values.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En el sistema circulatorio la sangre que retorna de los órganos por la vena cava inferior y superior, IVC y SVC, respectivamente, es bombeada por el sector derecho del corazón; circulando a través de la arteria pulmonar y sus ramificaciones izquierda y derecha que conducen hacia cada pulmón, LPA y RPA, respectivamente. Luego retorna a través de las venas pulmonares hacia el sector izquierdo del corazón, donde es bombeada nuevamente hacia el circuito sistémico.

La cirugía de Fontan se realiza en pacientes que presentan cardiopatías congénitas complejas en las cuales solo un lado del corazón bombea correctamente, es decir pacientes con una fisiología univentricular (Bingler, 2022). En esta cirugía se realiza la conexión cavopulmonar total, TCPC, que permite desviar el flujo que circula por un lado del corazón, haciendo pasar todo el retorno del circuito sistemático directamente hacia los pulmones. Consiste en conectar la vena cava inferior con ambas ramas de la arteria pulmonar, previamente conectada.

En los últimos años se han desarrollado diferentes geometrías de TCPC, cada una tiene ventajas comparativas en cuanto a la incidencia de arritmias y a la propensión de otras afecciones a largo plazo. Si bien estas complicaciones son multicausales, hay algunos parámetros hemodinámicos que son condicionantes. La resistencia hemodinámica o Pérdida de Potencia, PP, es aquella que ocurre debido a los efectos viscosos del fluido en la TCPC. Minimizar el valor de la misma significa reducir el trabajo de bombeo requerido por el lado útil del corazón. Además, un valor elevado de PP trae aparejados problemas relacionados con la alta presión cardíaca en los órganos que se encuentran aguas arriba de la TCPC y con la baja presión en los pulmones que se encuentran aguas abajo de la misma. Abordar estos aspectos resulta fundamental para optimizar tanto la función cardíaca como la salud global de los pacientes.

1.2. Justificación

A fin de generar información adicional que respalde el uso de una herramienta numérica de código abierto como *OpenFOAM*, que puede colaborar en el desarrollo y la optimización de las técnicas quirúrgicas, se realizaron simulaciones numéricas en distintas geometrías ideales de TCPC. Se espera que dicha herramienta sea utilizada en el marco del proyecto de *fluidodinámica computacional como asistencia en la planificación de cirugías cardiovasculares* (Dari, 2021). La planificación quirúrgica mediante CFD ofrece ventajas significativas. Permite evaluar opciones quirúrgicas de manera virtual, optimizar parámetros hemodinámicos y prever obstáculos. Esto reduce errores, utiliza información precisa sobre la anatomía y fisiología del paciente, mejora la comunicación entre el equipo médico y beneficia la formación de cirujanos (Goldman et al., 2022).

Para la elaboración de las distintas mallas se utilizaron funciones que parten de modelos construidos por diseño asistido por computadora, CAD, teniendo en cuenta que existen herramientas para recrear geometrías reales y llevarlas a este formato a partir de imágenes médicas.

Se plantea validar las soluciones numéricas mediante la comparación con resultados numéricos y experimentales de las PP obtenidas por Porfiriev et al. (2020).

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del caso a validar

Se valida en tres geometrías de TCPC descritas por Porfiriev et al. (2020), quien muestra resultados numéricos y experimentales en su trabajo. Estos modelos son denominados TCPC-1,

TCPC-2 y TCPC-3, cuya forma y dimensiones dadas en milímetros, se ilustran en la Figura 1.

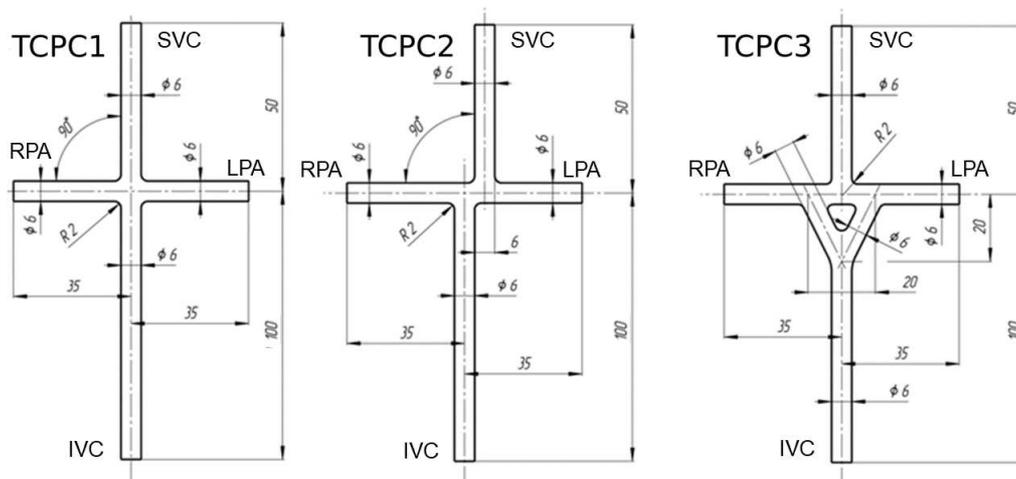


Figura 1: Esquema de las tres configuraciones geométricas de las TCPC utilizadas por Porfiriyev et al. (2020). **TCPC1:** Unión ortogonal simple, donde la IVC y SVC se conectan coaxialmente. **TCPC2:** Unión ortogonal con un desplazamiento paralelo entre IVC y SVC. **TCPC3:** Conexión oblicua en forma de Y, donde IVC se bifurca en dos conductos que se conectan con LPA y RPA. El gráfico está adaptado de la referencia.

En el estudio de Porfiriyev et al. (2020) se estableció una proporción constante para el flujo que ingresa al TCPC a través de las SVC e IVC, en un 37 % y 63 %, respectivamente y una salida del flujo a través de LPA y RPA en partes iguales. Además, incrementaron el flujo total que ingresa por ambas ramas de vena cava en un rango de 0,5 a 3 [L/min] en pasos de 0,5 [L/min], y midieron la PP del flujo correspondiente. Esta Pérdida de Potencia la calcularon según la Ec. (1) como la diferencia entre la potencia que ingresa a la TCPC menos la que egresa, tomando cada una a partir de mediciones de la presión y del caudal, como se indica en la Ec. (2).

$$PP = P_{SVC} + P_{IVC} - P_{LPA} - P_{RPA} \quad (1)$$

$$P_i = Q_i \cdot \left(\bar{p} + \frac{1}{2} \rho \overline{|\vec{v}|^2} \right)_i : i = SVC, IVC, RPA, LPA \quad (2)$$

donde Q_i es el caudal que atraviesa la sección asociada i , mientras que \bar{p}_i y $\frac{1}{2} \rho \overline{|\vec{v}|^2}_i$ son respectivamente las presiones estática y dinámica promedio en esta sección.

Realizaron las simulaciones numéricas considerando una densidad de $\rho = 1104 [kg/m^3]$ y una viscosidad de $\mu = 0,0035 [Pa \cdot s]$. En cuanto a la discretización numérica, usaron grillas no estructuradas, de aproximadamente 250000 volúmenes hexahédricos, con longitudes características en un rango de 0,001 a 1 [mm] dependiendo de la región de la malla. Mientras que la región más próxima a la pared la construyeron con seis capas de celdas con longitudes de 0,005 [mm] o más. Para la resolución supusieron un régimen laminar, estacionario, sin efectos gravitatorios y utilizaron un criterio de convergencia basado en que los residuos de la velocidad, las presiones en las entradas y el caudal másico en las salidas fueran menores a 0,001.

Los resultados reportados por Porfiriyev et al. (2020) y que se utilizan para validar la herramienta numérica usada en el presente estudio, se muestran en la Figura 2.

Se pretende que las condiciones de las simulaciones presentadas en el presente trabajo se asemejen a las experimentales reportadas por Porfiriyev et al. (2020). Por ello se replican las geometrías (Figura 1) y las ecuaciones utilizadas para el cálculo de PP (Ecs. (1) y (2)). Un

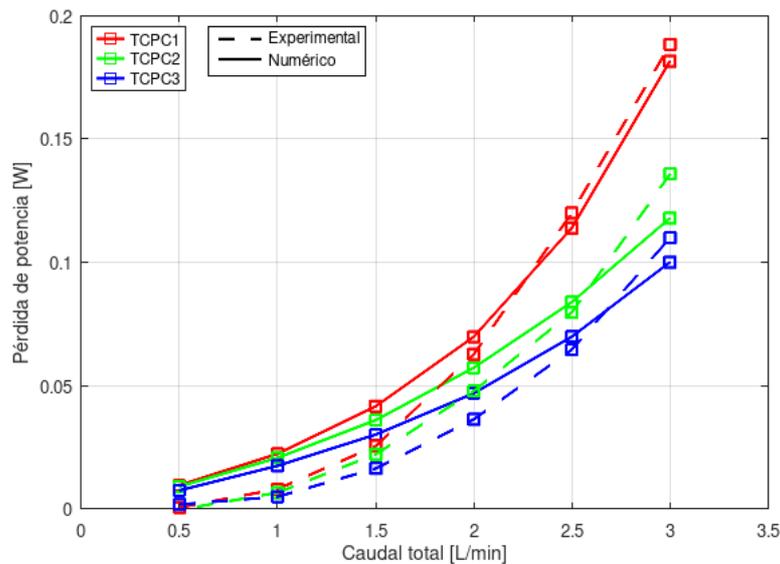


Figura 2: Resultados experimentales y numéricos reportados por [Porfiriyev et al. \(2020\)](#).

aspecto importante a mencionar aquí es que en dicha referencia no se indica claramente en qué secciones se tomaron las presiones estáticas y dinámicas de las soluciones numéricas. En el presente trabajo se toman las presiones en las secciones ubicadas en los extremos de los tubos que conforman las entradas y las salidas de las geometrías simuladas, y luego se analiza la influencia en los resultados de PP al tomarlas en las secciones correspondientes a los extremos del arreglo experimental ([Porfiriyev et al., 2020](#)).

2.2. Pre-procesamiento

2.2.1. Mallado

Se realizaron cuatro mallas de volúmenes hexahédricos no estructurados, TCPC-1, TCPC-2, TCPC-3 y TCPC-1 refinada, estas se corresponden con las geometrías utilizadas por [Porfiriyev et al. \(2020\)](#) (Figura 1). Cada malla se compone de finas capas de celdas en la zona de las paredes que se hacen mas gruesas a medida que se alejan de la pared, mientras que en el centro del volumen se forma una malla mas gruesa que se va refinando hacia los bordes y se une suavemente con las capas superficiales, generando una malla compuesta de estas dos. Las dimensiones de cada zona de las mallas se indican en la Tabla 1.

	TCPC-X	TCPC-1 Refinada
Tamaño nivel grueso [mm]	0,55	0,55
Tamaño nivel fino [mm]	0,27	0,1
Tamaño de capas [mm]	0.09	0.006
Celdas totales	244.000	469.000

Tabla 1: Dimensiones de las mallas utilizadas. TCPC-X representa a TCPC-1, 2 y 3.

Con el fin de averiguar si las soluciones obtenidas han convergido se realizó un análisis de sensibilidad de las PP respecto al tamaño de la malla, seleccionando algunos casos y repitiendo el cálculo con una grilla más refinada. Para ello se realizó una malla adicional con la geometría de TCPC-1 de [Porfiriyev et al. \(2020\)](#).

2.2.2. Condiciones de borde

Para las condiciones de contorno en las paredes y las entradas se utilizaron condiciones de no deslizamiento y de velocidad constante, respectivamente, imponiendo en ambos casos un gradiente de presión nulo. En cambio, en las salidas se utilizó una condición de borde de presión estática fija y gradiente de velocidad nulo.

Dado que en los resultados de referencia (Porfiriev et al., 2020) no se mencionan las condiciones de contorno utilizadas, se analizó la influencia en los resultados numéricos del uso de condiciones de contorno en las entradas como perfiles de velocidad desarrollados y uniformes. También se analizó la sensibilidad de la solución al utilizar condiciones advectivas de velocidad en las salidas y condiciones de presión calculadas en función del campo interno en las entradas.

2.3. Resolución numérica

Se realizaron cálculos de soluciones estacionarias y transitorias, para lo cual se utilizaron diferentes algoritmos.

Para las estacionarias se utilizó el algoritmo SIMPLEC (Doormall y Raithby, 1984). En cada simulación calculada con este algoritmo se halló el valor óptimo del factor de relajación, realizando simulaciones a partir de un valor que no produzca atenuación y luego reduciéndolo hasta que la solución se estabilice. Se utilizaron factores de relajación en el rango de 0,1 - 0,0001 y se utilizó como criterio de convergencia que los residuos de la solución entre dos pasos de tiempo sucesivos sean menores a una tolerancia de 10^{-5} .

Para las soluciones transitorias se utilizó el algoritmo denominado PIMPLE implementado en *OpenFOAM*. Este implementa por cada paso de tiempo una iteración del algoritmo PISO y múltiples iteraciones del algoritmo SIMPLE. Además se verificó el correcto funcionamiento de PIMPLE con un número de Courant máximo de 20, a partir de la comparación de sus soluciones con las soluciones obtenidas por el algoritmo PISO (Issa, 1985) utilizando un número de Courant máximo de 0,5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados estacionarios de PP en la geometría TCPC-1

Con el propósito de realizar la validación del caso de interés se calcularon las PP utilizando la malla TCPC-1 descrita anteriormente. Para ello se utilizaron las condiciones que especifica la bibliografía: caudales que van de 0,5 a $3[L/min]$, que ingresan por la SVC e IVC en proporción 37% y 63% y egresan por LPA y RPA en partes iguales. Para las simulaciones se consideró un régimen laminar estacionario. Se realizaron dos simulaciones, cada una con condiciones de borde diferentes, una con perfiles de velocidades en las entradas desarrollados y la otra con perfiles uniformes, dado que el trabajo citado no menciona el tipo de perfil de velocidad utilizado en las entradas. Los resultados se presentan en la Figura 3.

Se observa que las simulaciones con ambos perfiles de velocidad de entrada producen PP similares, y también una tendencia y orden de magnitud similar a los resultados experimentales reportados por Porfiriev et al. (2020). Sin embargo, dichas simulaciones tienden a subestimar considerablemente el valor real de las pérdidas de potencia entre un 11 y 58%.

Para verificar que se cumpla con el tipo de régimen supuesto, se calculó el número de Reynolds para el caso de mayor caudal ($3[L/min]$) en la entrada a través de la cual circula el 63% del flujo, y se obtuvo un valor de 2100. En investigaciones previas se ha demostrado que se pueden producir inestabilidades del flujo en canales de placas paralelas con números de Reynolds

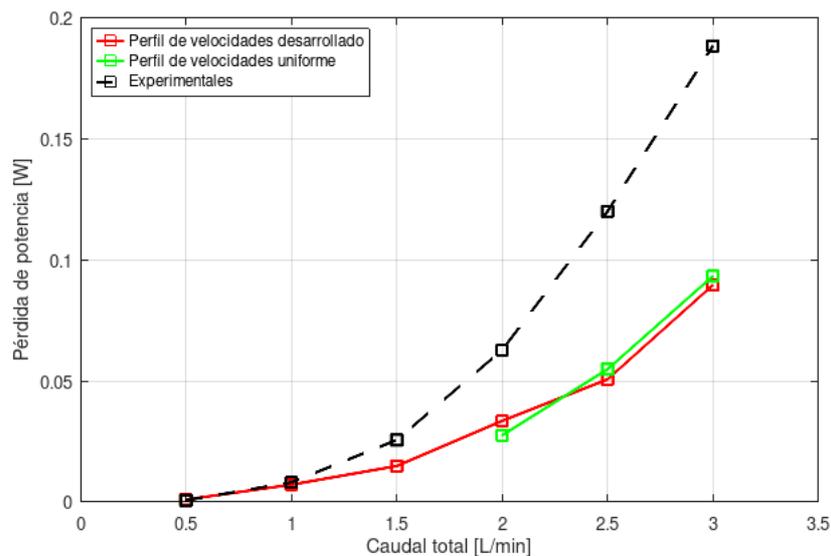


Figura 3: PP calculada numéricamente sobre la geometría TCPC-1, suponiendo un régimen laminar y estacionario.

cercanos a 1000 (Machaca, 2015). Esto sugiere que las inestabilidades del flujo podrían ser una fuente de errores en las soluciones numéricas obtenidas.

3.2. Resultados transitorios de PP en las geometrías TCPC-X

A fin de observar la posible incidencia de fenómenos transitorios en el cálculo se realizaron simulaciones utilizando las mallas TCPC-1, TCPC-2 y TCPC-3 y las condiciones que especifica la bibliografía, pero considerando un caso transitorio, laminar y con perfiles de velocidad desarrollados en las entradas.

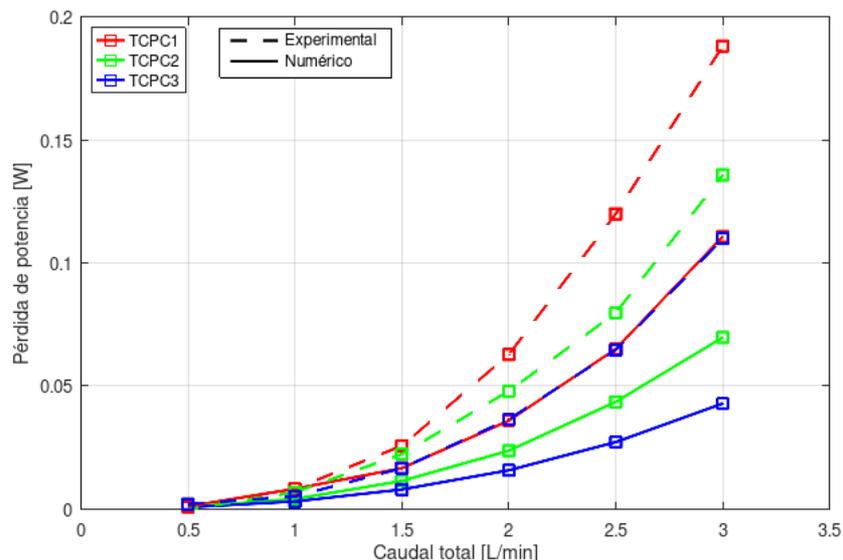


Figura 4: PP calculada numéricamente en función del caudal a partir de simulaciones transitorias y laminares, sobre las geometrías TCPC-1, TCPC-2 y TCPC-3.

Los valores numéricos (Figura 4) siguen la tendencia de los valores experimentales, pero la subestiman entre un 25 y 46%. En el caso de las simulaciones de las geometrías TCPC-1 y TCPC-2 con caudales mayores a $0,5 [L/min]$ y $1 [L/min]$, respectivamente, se obtuvieron

condiciones que no convergen a un estado estacionario. Entonces los valores reportados en estos casos fueron calculados como el promedio de los valores de PP a tiempos largos, en los cuales el promedio de los mismos tiende asintóticamente a un valor constante.

Según las observaciones experimentales de Porfiriev et al. (2020), en la configuración TCPC-1 los vasos sanguíneos se intersecan en ángulos rectos, lo que produce un abrupto incremento del valor de la velocidad en la región donde los caudales de IVC y SVC fluyen uno contra otro. En el caso de TCPC-2, el flujo se distribuye con mayor suavidad, aunque la presencia de una conexión ortogonal produce recirculaciones en los caudales provenientes de IVC y SVC. En el caso de TCPC-3, debido a la mayor suavidad en la conexión de los vasos sanguíneos, Porfiriev et al. (2020) obtuvieron campos de velocidad numéricos que tienen mayor semejanza con los experimentales. Se postula que esto se debe a que el campo de velocidad es más suave y puede ser capturado mejor por el modelo numérico.

Como consecuencia de la reducción de áreas propensas a la formación de zonas de recirculación y elevadas velocidades en el flujo, la TCPC-3 es la geometría que tiene mejores características energéticas y produce menor PP. Esto la posiciona como la elección más idónea para evitar elevadas presiones en los órganos que forman parte del circuito sistémico que se encuentra aguas arriba de la TCPC.

Según las observaciones de zonas de recirculación y teniendo en cuenta que se observaron fluctuaciones en los valores de la energía a tiempos largos en la mayor parte de las simulaciones, se continuó con la realización de simulaciones transitorias.

3.2.1. Análisis de convergencia de malla

Para verificar la convergencia espacial de la solución presentada en la subsección anterior se realizaron simulaciones de la geometría TCPC-1 refinada, utilizando los mismos modelos numéricos y condiciones de borde.

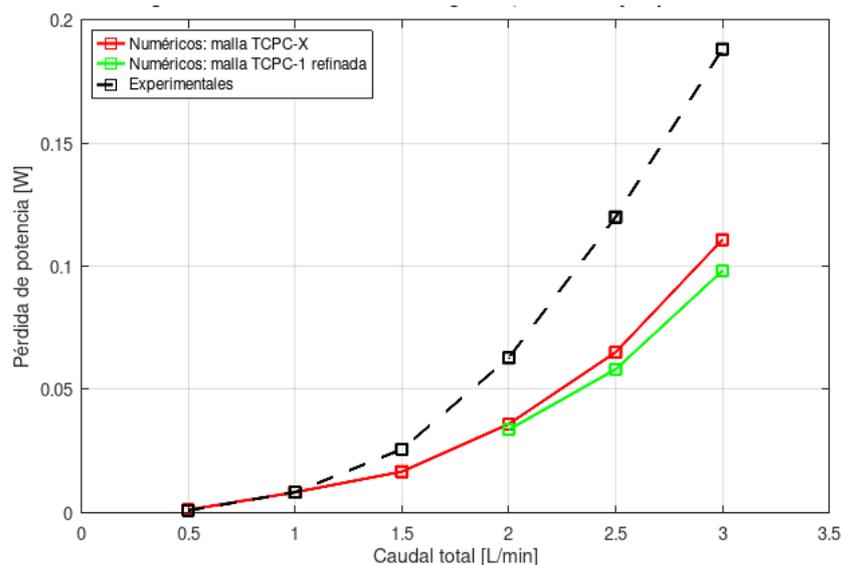


Figura 5: PP calculada para la geometría TCPC-1, suponiendo régimen laminar y usando un algoritmo transitorio (PIMPLE), utilizando dos mallas con diferentes tamaños de celdas, con la TCPC-1 y la TCPC-1 refinada.

De estos resultados (Figura 5) se observa que no se producen grandes variaciones al refinar la malla, ya que entre las PP obtenidas con la malla fina y la gruesa se obtienen una diferencias

porcentuales de entre el 6,3 y el 12,4 %. Entonces puede decirse que las soluciones con malla gruesa tienen un refinamiento suficiente para conseguir la convergencia de la solución. Además, el uso de la grilla gruesa permite reducir drásticamente el tiempo de cálculo, disminuyéndolo entre 10 y 70 veces en comparación con el requerido al utilizar la malla refinada. Por lo tanto, la eficiencia en costo computacional respalda la elección de la grilla gruesa en las condiciones del presente trabajo, sin comprometer la precisión numérica.

3.2.2. Análisis de sensibilidad ante las condiciones de borde

En las simulaciones previamente presentadas se utilizaron condiciones de no deslizamiento en las paredes, flujo desarrollado y gradiente de presión nulo en las entradas, y gradiente del campo de velocidades nulo y presión uniforme con valor nulo en las salidas. Con el fin de reproducir las condiciones experimentales de la mejor manera posible y evaluar la sensibilidad de la PP ante cambios en las mismas, se realizaron simulaciones considerando distintos aspectos.

En primer lugar se realizó una simulación con condición *calculada* de presión en función del campo interno en las entradas, con condiciones *advectivas* de velocidad en las salidas y de *valor medio fijo* con valor nulo de presión en las salidas. Con estas condiciones de borde se calculó la PP utilizando la malla TCPC-3 y un caudal de $3[L/min]$. Esto dió como resultado una PP en estado estacionario de $430mW$, que comparado al valor de $428mW$ obtenido con las condiciones de contorno previamente utilizadas representa una diferencia del 0,5 %, que se puede considerar despreciable respecto a la diferencia del 46 % de estos con el valor experimental.

Por lo pronto este análisis de sensibilidad y el realizado al considerar perfiles desarrollados y uniformes en el caso estacionario (ver Figura 3), permiten descartar la hipótesis de que la variación entre los distintos tipos de condiciones de borde analizadas tengan una influencia considerable sobre la PP.

3.2.3. Validación del algoritmo utilizado

Con el propósito de verificar el correcto funcionamiento del algoritmo PIMPLE, en especial su estabilidad con números de Courant mayores que 1, se realizaron simulaciones con el algoritmo PISO, utilizando la malla TCPC-1 y las condiciones de borde descriptas para las simulaciones anteriores. Estas simulaciones se realizaron tanto con el uso de algoritmos estacionarios como transitorios.

La diferencia entre los resultados obtenidos con el algoritmo PISO (estacionario y transitorio) resultaron menores al 6 % respecto de los obtenidos con el algoritmo PIMPLE. Esto implica que, aún en situaciones donde el algoritmo PIMPLE provea de una solución menos precisa, la misma resulta aceptable para los cálculos que se requieren en el contexto de esta validación. Esto verifica el funcionamiento del algoritmo PIMPLE con números de Courant menores a 20, valor que fue utilizado para estos cálculos.

3.2.4. Análisis de sensibilidad sobre la ubicación del lugar de medición

El trabajo experimental de [Porfiryev et al. \(2020\)](#) informa las dimensiones de las geometrías que utilizaron en el arreglo experimental y en los cálculos por CFD, así como los lugares donde tomaron las mediciones experimentales. Sin embargo, no se mencionan los lugares donde se toman las mediciones de las soluciones numéricas con las que luego calcularon la PP. Para los resultados reportados en el presente trabajo se utilizaron las secciones transversales a los conductos de entrada y salida ubicadas en los extremos de los mismos, según ilustra la Figura

1. Sin embargo, si se quisieran recrear las condiciones experimentales correspondería medirlos en las secciones más distantes de cada entrada y salida del TCPC experimental. De esta forma se garantizaría que los puntos de medición numéricos sean equivalentes a los puntos de medición experimentales, fortaleciendo así la coherencia entre los datos obtenidos y los resultados experimentales.

Para realizar esta estimación se calcula la diferencia de presión entre las secciones ubicadas a $46[mm]$ del centro de la geometría y las secciones anteriormente utilizadas, suponiendo perfiles laminares desarrollados en los distintos conductos. La diferencia de presiones se obtiene de la ecuación de Darcy-Weisbach, Ec. (3), utilizando un factor de fricción laminar dado por la Ec. (4). Se debe tener en cuenta que el flujo en las salidas no cumple con este régimen, con lo cual se subestima la variación de la PP en hasta un 24 % (estimado como la diferencia respecto de considerar régimen turbulento), sin embargo esto es suficiente para conocer su orden de magnitud.

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot f_D \cdot \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (3)$$

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

En la Tabla 2 se presentan las variaciones estimadas teniendo en cuenta la nueva ubicación de las zonas de medición. Para obtenerlos se utilizaron aquellos resultados obtenidos de las simulaciones de la geometría TCPC-1, reportados previamente en la Figura 4.

Caudal [L/min]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
ΔPP [mW]	-0,13	-0,50	-1,1	-2,0	-3,1	-4,5

Tabla 2: Estimación de las variaciones de PP causadas al cambiar la ubicación de las paredes del volumen de control considerado en la geometría TCPC-1.

Como se indica en la Figura 4, en los casos con mayores caudales se observan mayores diferencias respecto a los resultados experimentales, con un valor máximo de $77[mW]$ correspondiente a un caudal de $3[L/min]$. Las variaciones de PP calculadas en la presente subsección resultan un orden de magnitud menor y aumentan más esta diferencia respecto a los resultados experimentales. Entonces, se puede concluir que la mayor parte de la PP se origina en la zona central de la TCPC, subrayando la importancia crítica de este sector en la dinámica del flujo y sus implicaciones para la eficiencia hemodinámica.

4. CONCLUSIONES

A fin de reproducir numéricamente, con la mayor similitud posible, los datos experimentales de Porfiriyev et al. (2020), se realizaron simulaciones numéricas usando el código OpenFOAM en tres geometrías de Fontan ideales: TCPC-1, TCPC-2 y TCPC-3. Se supuso un régimen laminar y se tomaron en cuenta las características hemodinámicas del fluido. Las simulaciones se realizaron usando el algoritmo SIMPLEC (estacionario) y el algoritmo PIMPLE (transitorio).

En el caso estacionario, los resultados de la PP como función del caudal tuvieron una tendencia y orden de magnitud similares a los datos experimentales, subestimándolos entre un 11 y un 58 %.

Debido a la posible presencia de fenómenos temporales, se realizaron simulaciones en condiciones similares a las simulaciones estacionarias pero considerando un algoritmo transitorio.

Los resultados de PP produjeron una tendencia y orden de magnitud similares a los resultados experimentales, subestimando su valor entre un 25 y un 46 %.

En las simulaciones transitorias se observaron fluctuaciones de las cantidades de interés en los casos de TCPC-1 y TCPC-2 utilizando los caudales más elevados. Esta observación en conjunto con las observaciones experimentales realizadas por Porfiryev et al. (2020), lleva a considerar que probablemente la subestimación de la PP del presente estudio se debe a la existencia de inestabilidades en el flujo.

Se analizó la sensibilidad de la PP del flujo ante la utilización de condiciones de contorno más apropiadas para reproducir las condiciones experimentales, y se realizó un análisis de convergencia espacial. Los resultados mostraron que estas condiciones influyen en las PP, pero su impacto no es considerable teniendo en cuenta la magnitud de las diferencias con los resultados experimentales.

Se consideraron las variaciones de la PP producidas al modificar los sitios de medición de las presiones, con el objetivo de analizar los efectos de una incorrecta interpretación sobre la ubicación de los sitios de medición experimentales. Se observó que la mayor parte de la PP se produce en la parte central de la TCPC.

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan de manera consistente la tendencia y el orden de magnitud en relación con los datos experimentales de Porfiryev et al. (2020). Sin embargo, se destacan diferencias al compararlos con los resultados numéricos de dicho autor. En vista de estas discrepancias, una de las posibles explicaciones que los autores consideran es que el código empleado por Porfiryev et al. (2020) tenga algunos parámetros internos mejor optimizados para la resolución de estos casos. Se sugiere proseguir en la búsqueda de la causa de estas diferencias en los resultados, especialmente en torno a la estabilidad del flujo en los casos que circula mayor caudal.

REFERENCIAS

- Bingler M. The fontan procedure. <https://kidshealth.org/en/parents/fontan.html>, 2022. Online; 14-May-22.
- Dari E.A. PICT: Fluidodinámica computacional como asistencia en la planificación de cirugías cardiovasculares. *Fondo para la investigación científica y tecnológica, Argentina*, 2021.
- Doormall J.P.V. y Raithby G.D. Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical Heat Transfer*, 7:147–163, 1984.
- Goldman R.P., Bolecek R.C., Takeuchi P., Dari E.A., Sepulveda S., Delucis P.G., Cornelis C.J., y Berra I. Planeamiento prequirúrgico virtual y fluidodinámica computacional para el tratamiento de pacientes con cardiopatía congénita compleja. *SAC*, 2022.
- Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, 62:40–65, 1985.
- Machaca W. Esquemas compactos de alto orden para el estudio de la transferencia de calor en régimen de transición. En *Tesis de carrera de maestría en ingeniería*, páginas 101–103. Instituto Balseiro, 2015. Director: Dr. Federico Teruel.
- Porfiryev A., Markov A., Galyastov A., Denisov M., Burdukova O., Gerasimenko A., y Telyshev D. Fontan hemodynamics investigation via modeling and experimental characterization of idealized pediatric total cavopulmonary connection. *Applied Sciences*, 10(19):6910–6927, 2020.