

## **SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA MECANICA DE FLUIDOS APLICADA A PROBLEMAS DE LA INDUSTRIA SIDERURGICA**

**Damian E. Ramajo<sup>a</sup>, Norberto M. Nigro<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup> *Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), INTEC-CONICET,  
Universidad Nacional del Litoral, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina.*

<sup>b</sup> *Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral Ciudad Universitaria,  
Paraje el Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina*

**Palabras claves:** Industria siderúrgica, impacto ambiental, CFD

**Resúmen.** El presente trabajo tiene como objetivo mostrar algunas aplicaciones de una herramienta de simulación que ha tenido mucha difusión en los últimos años, como es el CFD (Computational Fluid Dynamics) a problemas de escala industrial donde se conjuga la complejidad física del problema con el importante tamaño del problema ingenieril. Esta herramienta ha mostrado estar a la altura de las necesidades de diseño de las oficinas técnicas que han requerido de sus servicios. Entre ellas podemos mencionar:

- la resolución de problemas de impacto ambiental en plantas siderúrgicas
- la resolución de varios problemas de la industria de refino de petróleo, como la erosión de conducciones de crudo, el ensuciamiento de reactores de polimerización, problemas de baja eficiencia en reactores de lecho fijo, problemas de cracking catalítico fluidizado, entre otros
- la resolución de problemas fluidodinámicos en reactores nucleares
- la asistencia al desarrollo de motores de combustión interna

Por razones de espacio en este trabajo mostraremos uno de los casos de aplicación del CFD al mejoramiento de sistemas de captación de aire en plantas siderúrgicas. Este ejemplo se trata del desarrollo de un sistema de ventilación para un horno eléctrico que tenía como inconveniente el elevado nivel de emisiones interna y externa cuando se producía la carga de la chatarra en el horno eléctrico. Los otros dos ejemplos, que se mostrarán en la presentación oral, tratan de disminuir la contaminación ambiental y mejorar las condiciones de trabajo en una planta de silos de almacenamiento de coque y minerales para un alto horno y el otro ejemplo es la verificación de una campana de captación de humos en una sala de colada de un alto horno. Estos casos han sido resueltos usando el software libre OpenFOAM y validados con el software comercial CFX de ANSYS como software de cálculo.

## 1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ANÁLISIS. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AIRE EN UNA SALA DE HORNOS ELÉCTRICOS

Este estudio tuvo como objetivo realizar el diagnóstico de funcionamiento y estudiar propuestas de mejora en la captación de gases fugitivos por parte del sistema de aspiración secundaria de un horno de arco eléctrico (). El estudio fue enfocado a maximizar la captación de gases y humos que se emiten durante el proceso de recarga. El estudio contempló la necesidad de reducir los niveles actuales de emisiones a la atmósfera cuidando no perjudicar el nivel de emisiones en el interior de la nave.

La carga de chatarra se lleva a cabo una única vez en cada proceso de colada. El horno tiene una capacidad aproximada de 110 toneladas y cada colada se lleva a cabo en aproximadamente 50 minutos. El proceso de carga de chatarra tiene una duración aproximada de 2 minutos, contados a partir del momento en que comienza a abrirse la bóveda del horno, se posiciona la cesta de carga, se descarga la chatarra y el horno vuelve a cerrarse.

Para maximizar la transferencia de calor el horno trabaja con un fondo líquido de entre 5 y 10 toneladas. Esto da origen a que durante el volcado de chatarra se produzca una fusión violenta de la chatarra, quemándose gran cantidad de residuos que esta posee (pintura, grasas, plásticos, etc.). Esto último da lugar a la generación de una gran cantidad de calor, gases y humos, los cuales ascienden rápidamente hacia la campana del sistema de captación secundario. Dicho sistema resulta ineficiente para captar la enorme cantidad de gases y por ello la campana se ve desbordada y gran parte de los gases y humos son evacuados por los monitores a ambos lados de la campana. En la figura 1 vemos la geometría de análisis

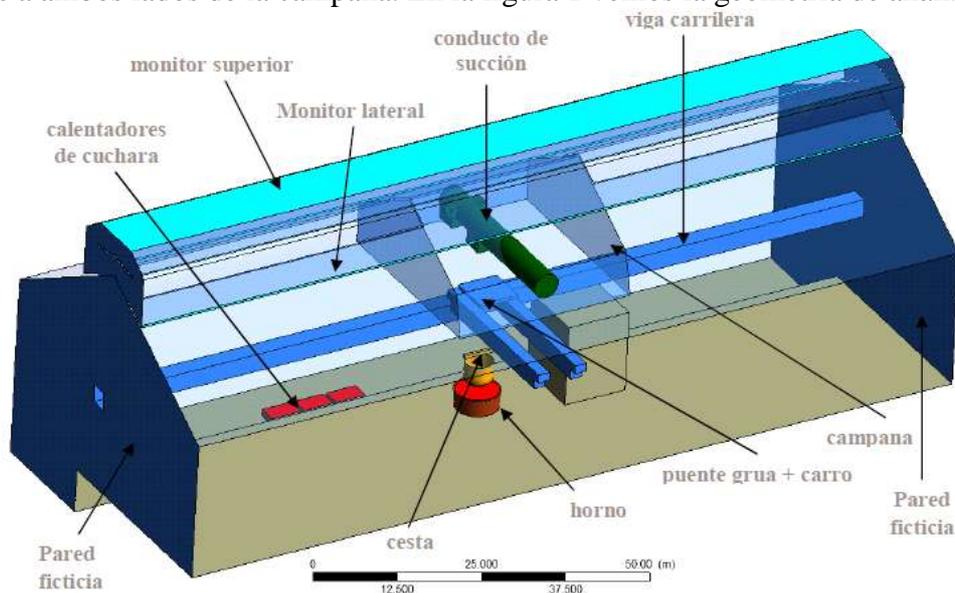


Fig. 1: Dominio computacional de análisis

La figura 2 muestra en detalle el conducto de extracción situado en el interior de la campana, donde pueden observarse las cuatro bocas de extracción, una denominada frontal ubicada justo por encima del horno y más cerca de la salida del conducto de la nave, una trasera ubicada hacia el otro extremo del conducto cuya función de diseño es captar los gases durante el sangrado del horno, y dos laterales una a derecha y otra a izquierda.

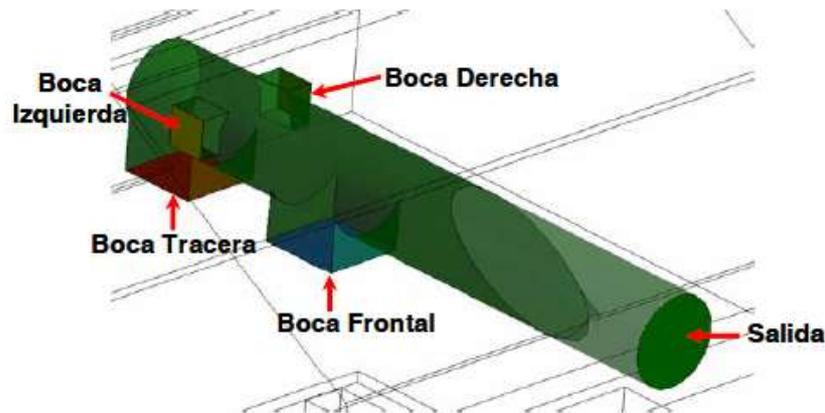


Fig. 2: Detalle de las bocas de extracción vigentes al comienzo del análisis.

Desde el punto de vista computacional el problema fue resuelto usando un modelo euleriano-lagrangiano (OpenCFD-OpenFOAM® (2009), ANSYS-CFX ), donde la fase continua representada por los gases limpios, el aire, se modela en forma euleriana como un gas ideal y los humos, o partículas de residuos de la combustión, se modelan como la fase dispersa y para ello se recurre a un tracking de partículas. A modo de un breve resumen de estos modelos podemos mencionar que mientras los primeros resuelven los balances de masa, cantidad de movimiento y energía con una formulación euleriana usando volúmenes finitos, para la fase dispersa se resuelve la dinámica de una población de partículas con determinados diámetros representando las partículas de polvo. Sobre estas últimas actúa el arrastre de la fase continua y las fuerzas de inercia propia de la densidad de las propias partículas y las fuerzas de drag entre las fases. Por razones de plazos de entrega el modelo, como se detalla en la figura 1, excluye el cálculo en el exterior de la nave. Si se quisiera enriquecer el modelo la salida por los monitores superiores debería surgir del modelo incluyendo el modelado exterior en lugar de imponer una depresión en los mismos. De todos modos en ese caso se hace necesario tener datos meteorológicos en las inmediaciones de la nave y luego considerar algunos de los peores escenarios en cuanto a intensidad y dirección de los vientos así como datos sobre turbulencia atmosférica. Para evitar esta complejidad en este estudio se incluyó solo el interior de la nave. Las condiciones de contorno del modelo son las siguientes:

- Caudal impuesto en la superficie de salida del conducto de extracción
- Ingreso de gas y liberación de calor en la superficie superior del horno usando estimaciones provistas por ingenieros de planta y contrastadas contra simulaciones similares encontradas en la literatura específica (Kickingner et.al. (1999), Kirschen et.al., *Energy* (2006))
- Depresión de 20 pascales en ambos monitores, correspondiente a un viento exterior de baja intensidad, aproximadamente de 20km/h.
- Presión impuesta considerando el gradiente de presión hidrostático en los dos contornos denominados como pared ficticia en la figura 1
- Condición de pared sin deslizamiento en las paredes de la nave y todas las paredes internas (ej. viga carrilera)
- Condición adiabática para los objetos internos (ej. viga carrilera)
- Temperatura impuesta en el techo de la nave (20°C)
- Flujo de calor en la superficie de los calentadores de cuchara

Las condiciones iniciales son las siguientes:

- Velocidad nula en toda la nave
- Temperatura homogénea igual a 25°C
- Perfil de presión hidrostática

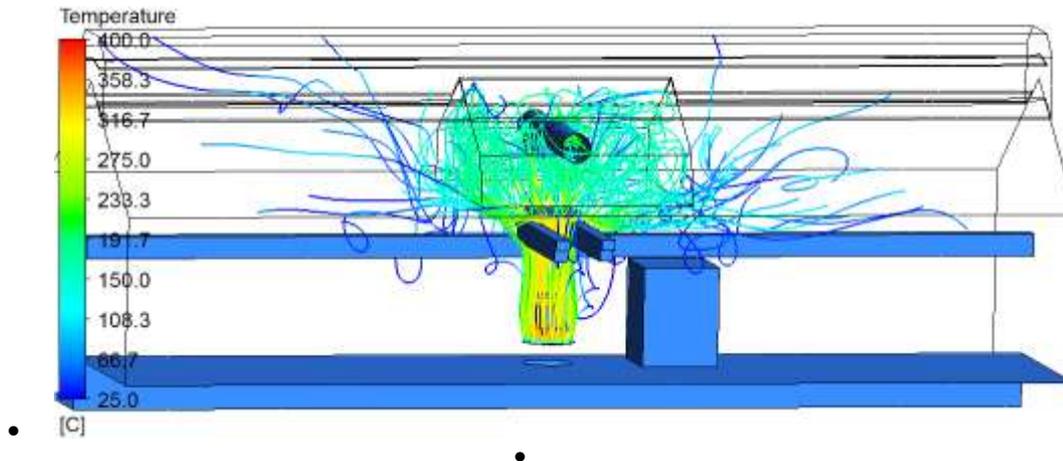


Figura 3. Trayectoria trazada por un grupo de partículas luego de los primeros 35 seg. De simulación

La figura 3 muestra nuevamente la trayectoria trazada por algunas partículas pero en este caso luego de los primeros 70 segundos. de simulación, es decir cuando el horno cesa su emisión. Para este instante el desborde se vuelve aún más notorio.

La figura 4 muestra la trayectoria trazada por un grupo de partículas que finalmente salen del dominio a través del monitor superior. Esta figura resulta muy útil para destacar el hecho de que gran parte de las partículas que son emitidas al exterior de la nave en algún momento ingresaron al interior de la campana pero la misma no fue capaz de retenerlas hasta ser captadas por el conducto de succión. Esto muestra la ineficiencia del emplazamiento de las actuales bocas de captación.

La figura 5 muestra los caudales máxicos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) tanto aquellos emitidos por el horno como aquellos captados por las cuatro bocas del conducto de succión.

Esta figura muestra claramente el comportamiento descrito anteriormente para las bocas frontal y trasera. Como se observa, durante los primeros 10 seg. de simulación la generación de gases desde el horno es baja y la boca que mayor caudal succiona es la frontal (más próxima a la salida del conducto).

Posteriormente, al incrementarse el flujo de gases ascendentes, la deflexión producida por el carro origina que la boca con mayor succión sea la trasera. Este comportamiento vuelve a revertirse al cesar la generación de humos por parte del horno. Este efecto se visualiza en las curvas azul y roja de la figura 5

Cabe mencionar que las bocas laterales (curvas amarilla y verde) tienen escasa participación en el caudal aspirado, aunque debe tenerse en cuenta que las mismas son de un tamaño muy inferior a las otras dos. La simulación además muestra que al finalizar la emisión de humos se observa una rápida limpieza de la nave, tal como se verifica en la realidad. Es destacable la permanencia de gases calientes en la parte superior de la campana, los cuales resultan difíciles de remover dado que las bocas de captación se encuentran por debajo de los mismos. Esto indica la necesidad de captar los humos lo más arriba posible, siguiendo el camino natural de los gases calientes. Al mismo tiempo, al ascender, las partículas de humo pierden energía

cinética, reduciéndose las colisiones contra las paredes de la campana.

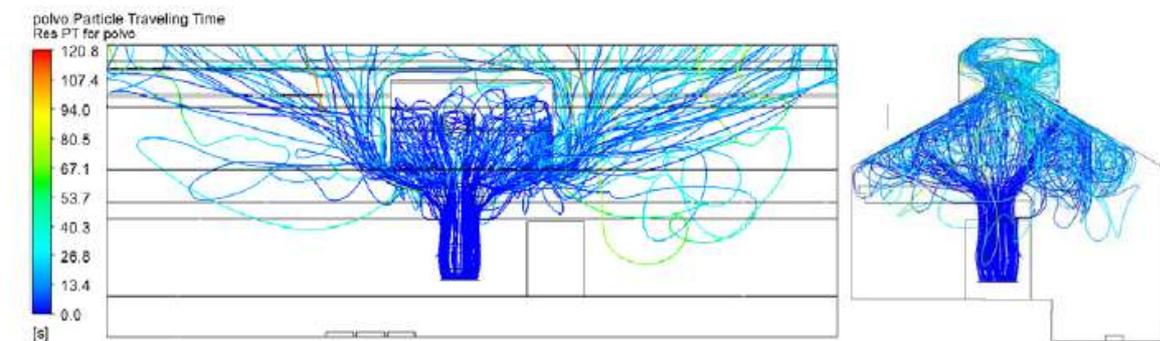


Figura 4. Trayectoria trazada por un grupo de partículas que finalmente salen del dominio a través del monitor superior.

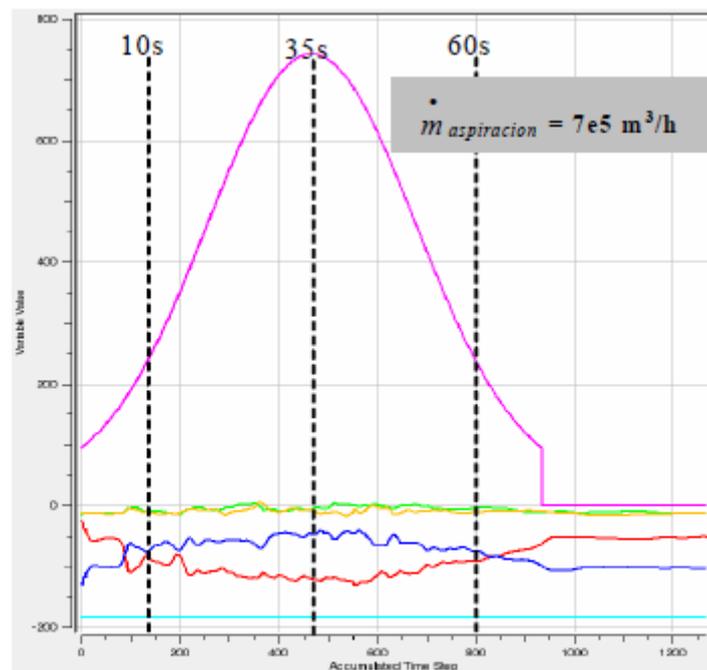


Figura 5. Caudales máxicos inyectados por el horno (curva lila) y captados por las bocas frontal (curva azul), trasera (curva roja), lateral derecha (curva verde) y lateral izquierda (curva amarilla).

## 2 MODIFICACIONES PROPUESTAS. AUMENTO DEL CAUDAL DE ASPIRACIÓN.

Se han probado varias modificaciones, algunas de las cuales serán mostradas a lo largo de este trabajo, entre ellas un aumento del caudal de aspiración de 700 mil m<sup>3</sup>/hr a 1,5 millones m<sup>3</sup>/hr que fue una de las principales sugerencias de la planta. En la figura 6 vemos como se evacuan los gases con el caudal menor mientras que en la figura 7 vemos qué sucede cuando hacemos circular el caudal mayor. En ambas figuras se muestra la magnitud de la velocidad sobre los planos medios. La boca trasera recibe en forma directa el flujo de gases ascendentes aunque en este caso se percibe una mayor velocidad en las inmediaciones de la boca frontal producto de haber duplicado el caudal total de aspiración. Al comparar ambas figuras de la

derecha puede observarse que al aumentar el caudal se produce un menor desborde sobre la pared lateral derecha de la campana.

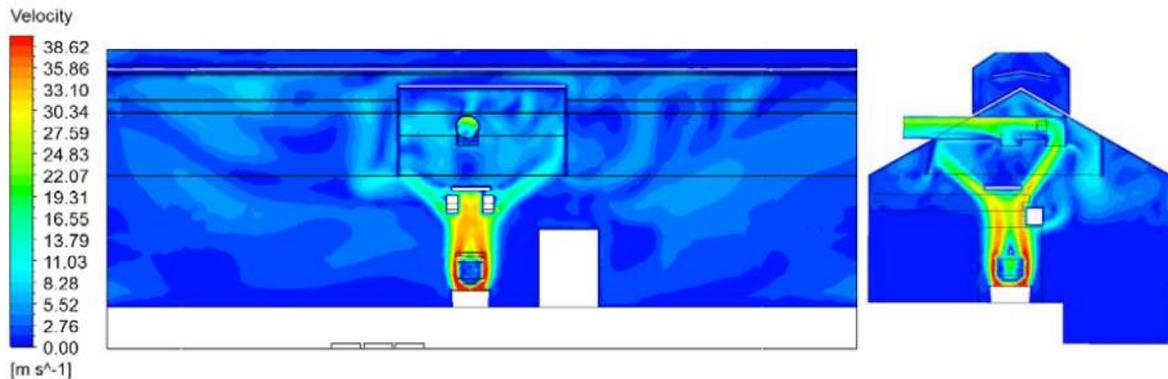


Figura 6. Velocidad de ascenso de los gases inducido por el sistema de captación a 700,000 m<sup>3</sup>/hr

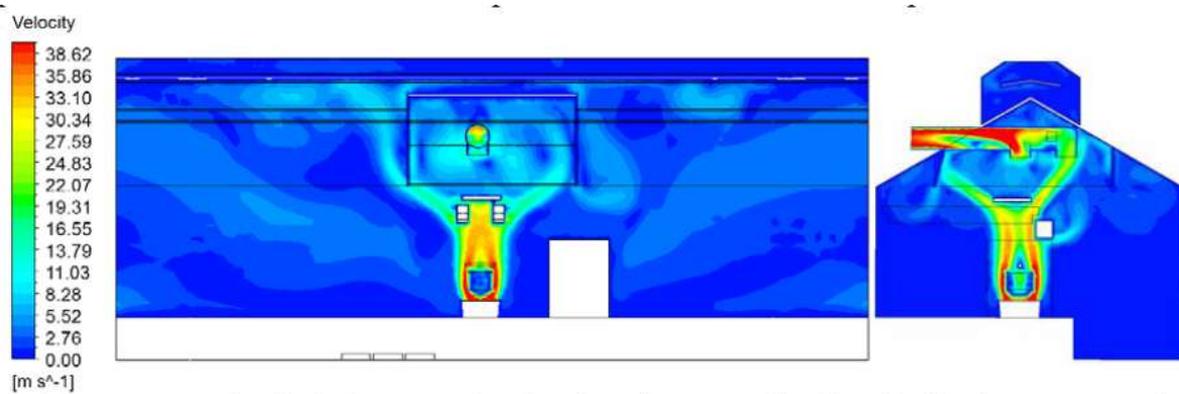


Figura 7. Velocidad de ascenso de los gases inducido por el sistema de captación a 1,500,000 m<sup>3</sup>/hr

La figura 8 muestra la velocidad vertical sobre un plano horizontal a 0.5 m debajo de las bocas de captación a distintos tiempos. En este caso, la magnitud de la velocidad sobre la boca frontal es comparable a la obtenida sobre la boca trasera para los tres instantes mostrados. Si se grafican otra vez los caudales máxicos en cada una de las bocas puede observarse que inicialmente la boca frontal tiene un mayor caudal pero después de los primeros 10 seg., ambos caudales prácticamente se igualan.

Resulta notoria la velocidad negativa (descendente) de los gases alrededor de la boca frontal para  $t=35$  seg. Esto es causado por el “rebote” de los gases en la parte superior de la campana. En cuanto a la presión estática, esta también resulta comparable para ambas bocas pero al cesar por completo la generación de humos puede advertirse la mayor depresión que posee la boca frontal respecto de la trasera.

La figura 9 muestra la cantidad acumulada de partículas generadas por el horno y la cantidad de partículas que permanecen en la nave en cada instante de tiempo para los dos caudales de aspiración estudiados. Como se observa, el incremento en el caudal de aspiración muestra una reducción poco apreciable en la cantidad de partículas en el interior de la nave, reducción que posiblemente sea poco observable en la realidad. Durante los primeros 30 seg. la curva de emisión de partículas del horno y las de acumulación evolucionan casi en igual medida. Pasados los primeros 30 seg. el horno disminuye su emisión al tiempo que el sistema de

succión comienza a remover partículas, originando que las curvas se separen. Finalmente, luego de 140 seg. se observa una concentración residual similar para ambos caudales de aspiración, de alrededor de 250 partículas, equivalente a casi el 8% de las partículas emitidas

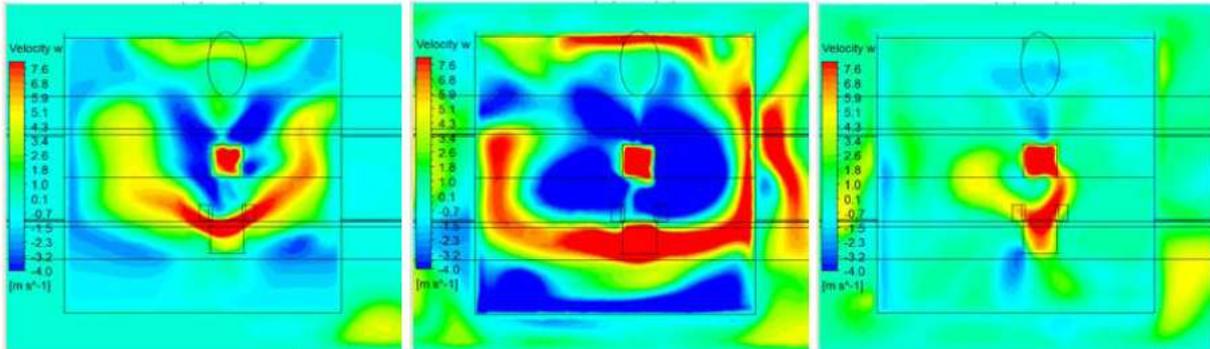


Figura 8. Velocidad vertical en un plano horizontal a 0.5 m debajo de las bocas de captación. Izquierda: t=10 seg. Centro: t=35 seg. Derecha: t=70 seg.

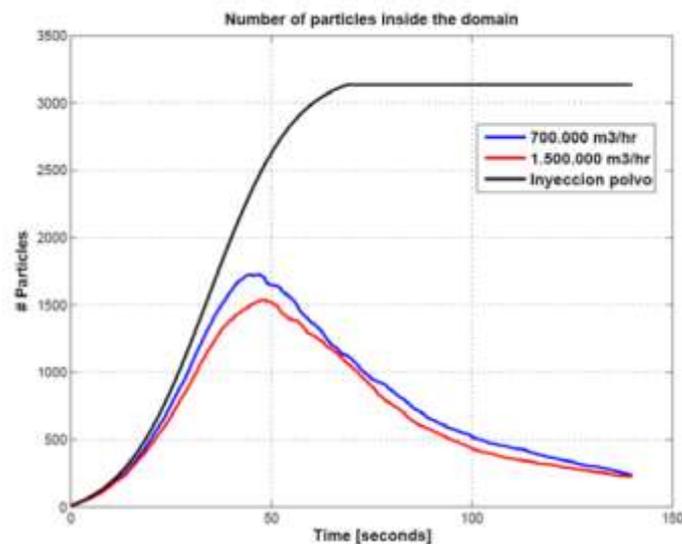


Figura 9. Cantidad acumulada en el tiempo de partículas dentro de la nave para los dos caudales de aspiración.

Cabe mencionar que la cantidad de partículas mostrada en la figura 9 solo cuantifica a aquellas que continúan en el interior del dominio. Aquellas partículas que salen del mismo a través de las paredes ficticias del modelo también permanecen en el interior de la nave por lo que deben ser tenidas en cuenta. La figura 10 muestra los caudales máscicos de gas extraídos a través del monitor (tanto superior como lateral).

Lo que se referencia como V7 corresponde al caudal de aspiración menor ( $7e5$  m<sup>3</sup>/h) en tanto que la referencia V8 corresponde al caudal incrementado. Notar que el incremento en el caudal de succión origina una merma en la succión del monitor, explicando el cambio poco apreciable en la concentración de partículas en el interior de la nave.

Como se observa, los monitores laterales contribuyen escasamente a la extracción de gases (líneas punteadas en la figura).

La figura 11 muestra la evolución del porcentaje acumulado de partículas que salen del

dominio computacional. En estas gráficas también se han incluido las partículas que abandonan el dominio a través de las paredes ficticias (denominadas lateral 1 y lateral 2). Notar que los porcentajes consignados en la tabla 1 coinciden con los valores obtenidos en las curvas para 140 seg. En particular para el exterior equivalen a la suma de los monitores superior y lateral.

Como puede observarse, el incremento en el caudal produce un cambio significativo si se considera qué, para el caudal actual el mayor porcentaje de partículas egresa a través del monitor y al incrementar el caudal esta situación debería revertirse.

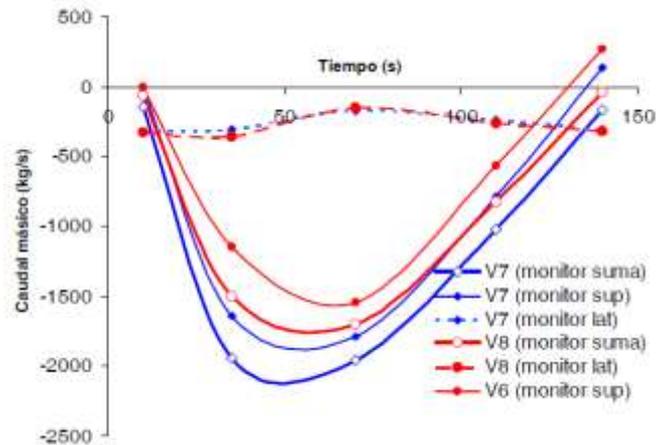


Figura 10. Caudal másico de gas a través del monitor para ambos caudales de aspiración (V7: caudal  $7e5$  m<sup>3</sup>/h, V8: caudal  $15e5$  m<sup>3</sup>/h).

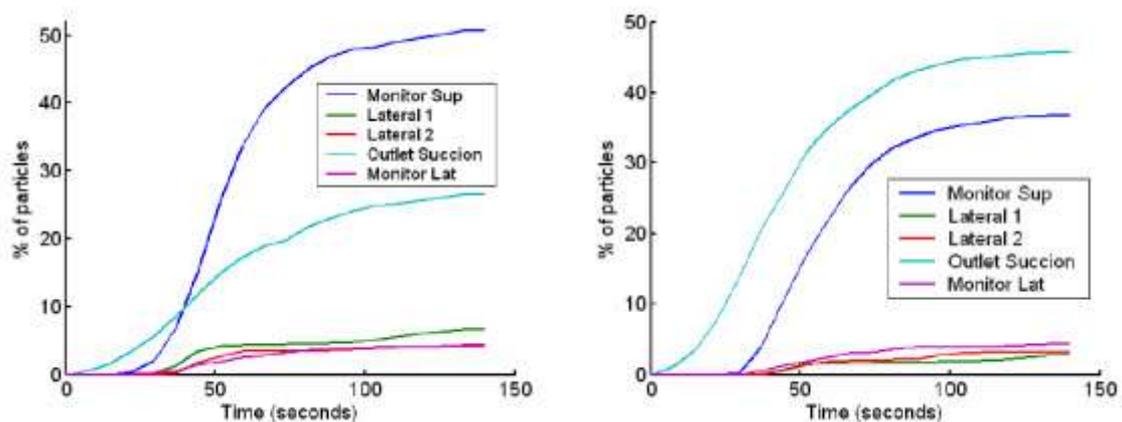


Figura 11. Porcentaje acumulado de partículas que abandonan el dominio computacional. Izquierda: caudal de succión de  $7e5$  m<sup>3</sup>/h. Derecha: caudal de succión de  $15e5$  m<sup>3</sup>/h.

Pero, más allá de este hecho, el porcentaje que egresa a través del monitor continúa siendo muy significativo. Para finalizar esta sección se puede agregar que un cambio en el caudal de aspiración es una inversión apreciable en una planta de este tipo, sumado a los tiempos de parada que se requerirían para implementarlo. Si su impacto en la polución interior no se viera notoriamente reducido esto redundaría en un gasto inútil y una considerable pérdida de tiempo que muchas veces es determinante en el éxito de la gestión empresarial. Por tal motivo el CFD permite prever estas situaciones y buscar mejores soluciones sin tener que probar nada con un considerable ahorro de tiempo y dinero.

### 3 PROPUESTAS DE MEJORAS GEOMÉTRICAS

En la segunda parte de este trabajo se comparan diez nuevas propuestas de mejora, mayormente geométricas y de layout, las cuales se suman a la propuesta de incremento de caudal estudiada en la primera parte del informe. Dentro de estas diez propuestas seis corresponden a modificaciones geométricas en tanto que las otras cuatro son cambios en el caudal de aspiración y/o en el cerrado total o parcial de monitor. A continuación se describen brevemente las propuestas mencionadas:

**modelo 1:** consistente en eliminar el conducto actual de aspiración, desplazar 5 m una de las paredes laterales de la campana y anexas a la campana el volumen del monitor sobre la misma. En este modelo la aspiración se lleva a cabo con una única boca de captación colocada en el volumen del monitor anexo a la campana. El caudal de succión es de  $15 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 2:** es similar al modelo 1 pero anexando una segunda boca de captación e incrementando el caudal de succión a  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h.

**modelo 3:** idéntico al modelo anterior (modelo 2) pero en este caso el monitor abierto al exterior ha sido completamente cerrado

**modelo 4:** idéntico al modelo 2 pero incrementando el caudal de succión desde  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h hasta  $30 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 5:** idéntico al modelo 2 pero incrementando el caudal de succión desde  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h hasta  $39 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 6:** consiste en modificar el conducto de aspiración actual y al mismo tiempo agregar un conducto adicional con dos bocas en el volumen del monitor adicionado a la campana. En este caso el caudal de aspiración es de  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h. Esta propuesta fue pedida por el comitente en pos de estudiar si es posible salvar el conducto actual.

**modelo 7:** consiste en colocar un único conducto de aspiración con una boca de succión en la parte superior del monitor adosado a la campana. Dicha boca tiene un ancho igual al de la campana. En este caso el caudal de aspiración es de  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 8:** este modelo es una variante del anterior en la que una parte del techo de la campana ha sido removida para permitir una circulación más directa de los gases hacia el conducto de aspiración. El caudal de aspiración es de  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 9:** este modelo se basa en el modelo 2 pero ampliando el ancho de la campana 10 metros hacia cada lado y colocando una tercera boca de extracción. Además parte del monitor ha sido cerrado a ambos lados de la campana (aproximadamente 24 metros a cada lado). El caudal de aspiración es de  $30 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 10:** este modelo es geoméricamente igual al modelo 9 pero en este caso el monitor superior ha sido cerrado completamente y solo se mantiene abierto el último tramo del monitor lateral. El caudal de aspiración es de  $30 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

**modelo 11:** este modelo es geoméricamente igual al modelo 10 pero para un caudal de aspiración de solo  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h

#### 3.1 Los primeros modelos. Modelos 1 y 2

El modelo 1 tiene el objetivo de estudiar el efecto de anexas el monitor a la campana y colocar el conducto de succión en la parte superior de la misma. Los modelos 2, 4 y 5 tienen el objeto de verificar si existe un caudal óptimo para el cual es posible obtener una reducción completa o aceptable de los humos que escapan al exterior por el monitor. El modelo 3 persigue analizar el impacto de cerrar completamente el monitor. Los modelos 6 y 7 son propuestas sugeridas por el comitente. El modelo 8 es una modificación menor respecto del modelo 7. Los modelos 9, 10 y 11 estudian el efecto de continuar incrementando el tamaño de la

campana y de cerrar parcialmente el monitor.

El mismo consiste de una boca de extracción ubicada en la pared vertical del volumen del monitor original que ha sido adicionado a la campana.

El modelo 2 geoméricamente igual a los modelos 3, 4 y 5 consiste en agregar una segunda boca de extracción a la existente en el modelo 1. El caudal de succión es de  $21e5$  m<sup>3</sup>/h. Los resultados obtenidos con este modelo se consideran entre los más relevantes por lo que la descripción de los mismos será más pormenorizada a fin de destacar las mejoras obtenidas.

La figura 13 muestra la trayectoria de algunas de las partículas que abandonan la nave a través de las bocas de succión. Esta figura aporta una conclusión que es clave; pocas partículas que escapan de la campana logran ser nuevamente captadas por la misma y evacuadas por el sistema de captación. Es decir que, una vez que el polvo abandona la campana o bien permanecerá en la nave o será succionado por el monitor.

En la figura 14 se trazan los porcentajes acumulados de partículas para cada contorno de la nave. Como puede observarse, ambas bocas de captación tienen una eficiencia similar, aunque aquella ubicada hacia el horno 5 (un horno vecino de los 3 que están emplazados en la nave) posee una pequeña supremacía sobre la otra. El porcentaje evacuado por el monitor ronda el 27% mientras que la succión alcanza al 65.6%. Como puede observarse, la cantidad de partículas en el interior de la nave también se ve reducida sensiblemente.

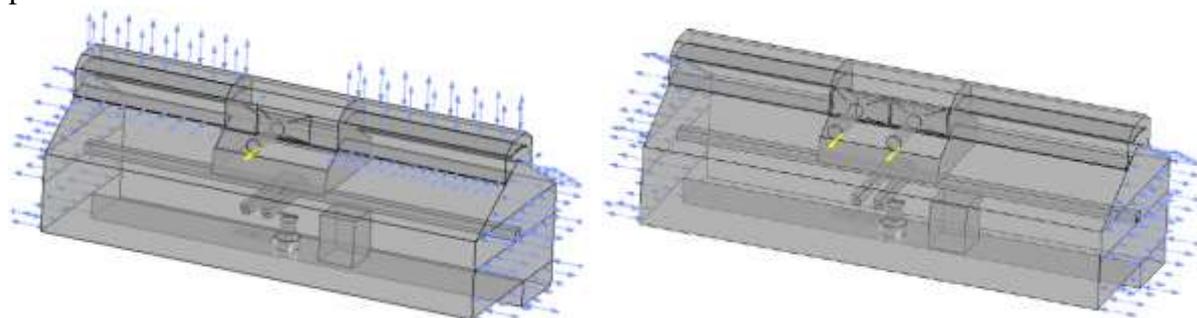


Figura 12: Izquierda: Modelo 1. Derecha Modelo 2

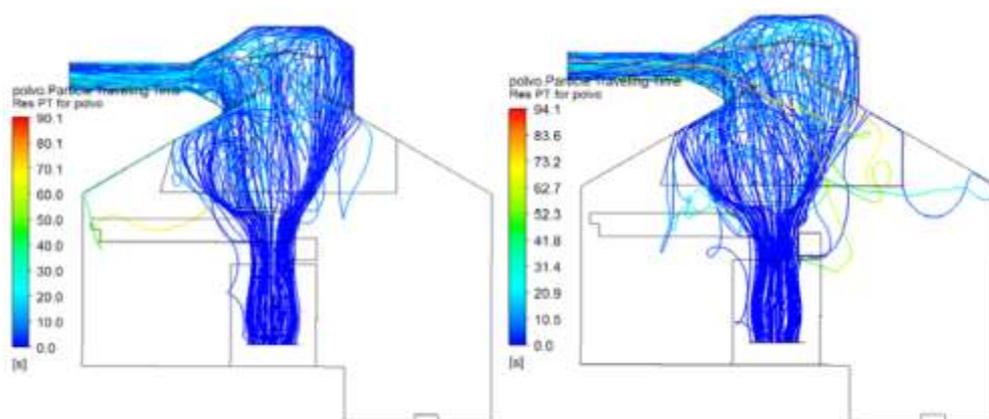


Figura 13: Trayectoria de las partículas que salen por cada una de las bocas de aspiración

Los modelos 4 y 5 son variaciones del modelo 2 pero con mayores caudales. Una comparación entre ellos se puede observar en la siguiente tabla. Esta resume los resultados obtenidos con los tres modelos junto con el modelo correspondiente a la condición actual. Como puede observarse la mejora respecto del incremento del caudal es observada en todos los sentidos.

Es decir que las fracciones de polvo residual y de emisiones exteriores se ven reducidas continuamente mientras que el porcentaje de succión a través de las bocas de captación se incrementa.

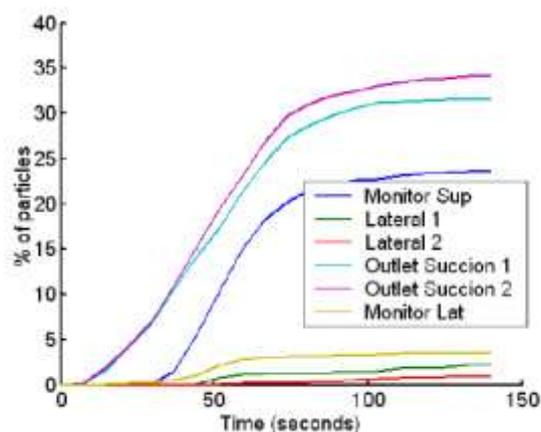


Figura 14: Porcentaje de partículas egresadas por cada contorno del modelo

No obstante, si se trazan dichos resultados en gráficas en función del caudal de succión se observa que dicha mejora no es lineal con el caudal sino que cuanto mayor es el caudal menor es la eficiencia que se obtiene al incrementarlo.

Porcentuales					
Periodo = 0-140 seg.					
Geometría	Caudal succión (m <sup>3</sup> /h)	Residual dominio	Residual dominio + paredes ficticias	Exterior	Succión
Original	7x10 <sup>3</sup>	7.5	18.4	55.0	26.6
Modelo 2	21x10 <sup>3</sup>	4.1	7.2	27.0	65.6
Modelo 4	30x10 <sup>3</sup>	2.3	3.9	18.0	78.1
Modelo 5	39x10 <sup>3</sup>	1.4	2.5	12.4	85.1

Tabla 1: Porcentaje de partículas a través de los contornos de la nave.

Esto puede observarse en la figura 15. La misma muestra la evolución de los porcentajes de partículas que permanecen en la nave (figura de la izquierda) en función del caudal de aspiración. La curva azul corresponde a las partículas que permanecen dentro del dominio simulado, mientras que la curva verde es la suma de dichas partículas y de aquellas que abandonan el dominio a través de las paredes ficticias, y que por ello continúan dentro de la acera. Como dato comparativo, el porcentaje de partículas obtenido para el modelo original (estado actual) es de 18.2% mientras que con el modelo 2 se reduce a poco más de 7%. La figura 15 a la derecha permite observar los porcentajes de partículas captadas por el monitor y por el sistema de succión. La captación mejora notoriamente al incrementar el caudal de succión. No obstante, el quiebre en la curva indica que la eficiencia de captación disminuye

### 3.2 Modelo 6

La geometría correspondiente al modelo 6 es mostrada en la figura 16. Como se observa, existe un conducto de succión superior, el cual se divide en dos bocas de aspiración. Al mismo tiempo, el conducto de aspiración actual (conducto inferior) ha sido modificado, colocándole dos bocas de captación, una a cada lado de la campana (en dirección transversal a

la nave). Ambos conductos de extracción (inferior y superior) tienen un caudal de aspiración de  $10.5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h.

La figura 17 muestra la distribución de porcentajes de partículas que egresan por los contornos de la nave. Notar la diferencia en la captación observada para los conductos de extracción superior e inferior. El conducto superior tiene una clara supremacía en cuanto a la extracción de partículas, a pesar de que en ambos se impone el mismo caudal de succión de gas. Esto indica que el conducto inferior tiene una baja eficiencia de captación, fundamentalmente luego de finalizada la generación de gases ( $t > 70$  seg.).

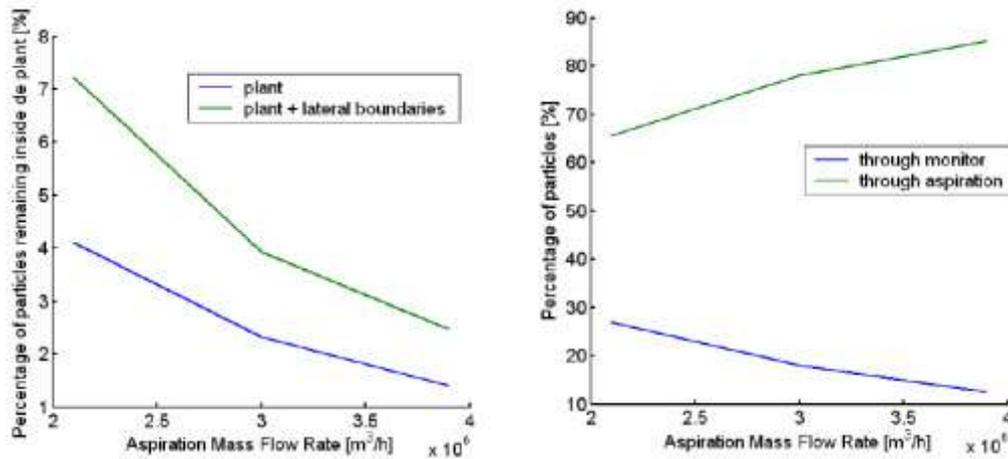


Figura 15: Porcentaje de partículas por cada contorno con los tres caudales de aspiración. Izquierda: % de partículas residuales en la nave. Derecha: % de partículas que egresan por el monitor y por la succión.

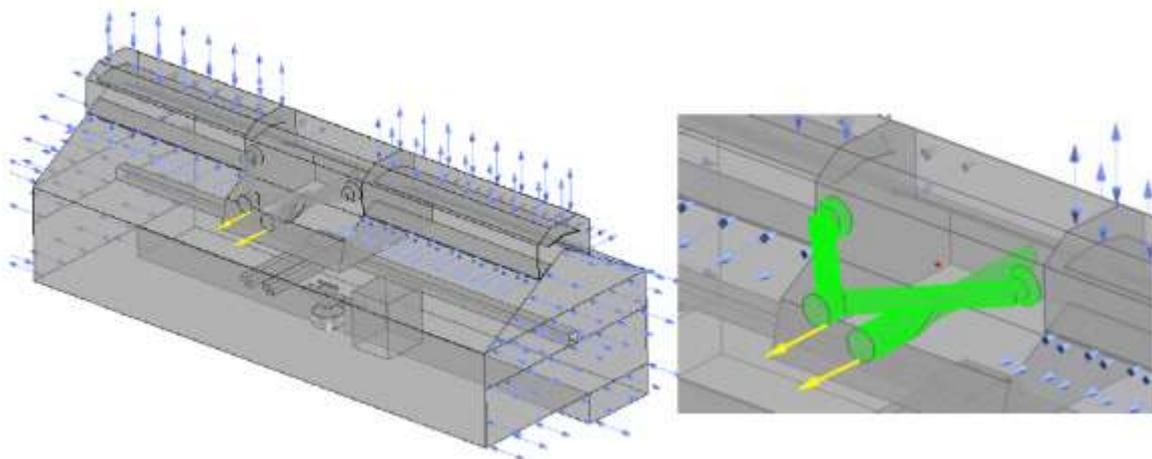


Figura 16: Geometría del modelo 6

Esto último indica que las partículas una vez que ascienden más allá de este conducto, permanecen en la parte superior de la campana y finalmente son removidas por el conducto superior. En cuanto al porcentaje de partículas que salen por el monitor, dicho valor se ve levemente incrementado cuando se lo compara con lo obtenido para el modelo 2.

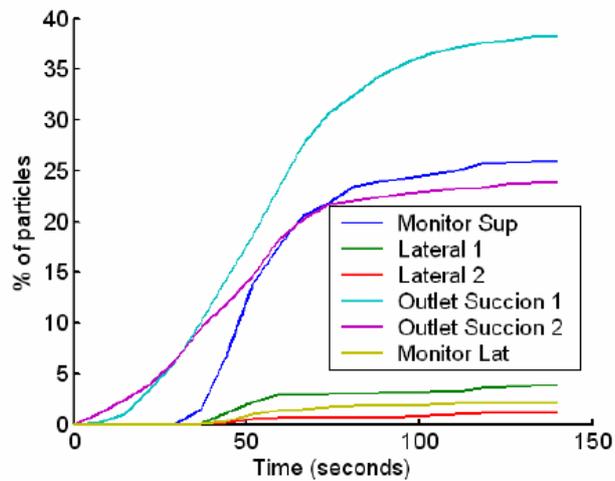


Figura 17: Porcentaje de partículas por cada contorno del modelo.

La [tabla 2](#) resume los resultados obtenidos con el modelo 6 y permite su comparación con el modelo 2 de igual caudal. Como puede apreciarse las diferencias son poco significativas aunque este último parece ser mejor.

Porcentuales					
Periodo = 0-140 seg.					
Geometría	Caudal succión (m <sup>3</sup> /h)	Residual dominio	Residual dominio + paredes ficticias	Exterior	Succión
Original	7x10 <sup>3</sup>	7.5	18.4	55.0	26.6
Modelo 2	21x10 <sup>3</sup>	4.1	7.2	27.0	65.6
Modelo 6	21x10 <sup>3</sup>	4.9	9.9	28.1	62.0

Tabla 2: Porcentaje de partículas a través de los contornos de la nave.

### 3.3 Modelos 7 y 8

A continuación se muestran las últimas evoluciones de los modelos propuestos en este trabajo que pretenden aprovechar las ventajas y desventajas de los modelos anteriormente ensayados.

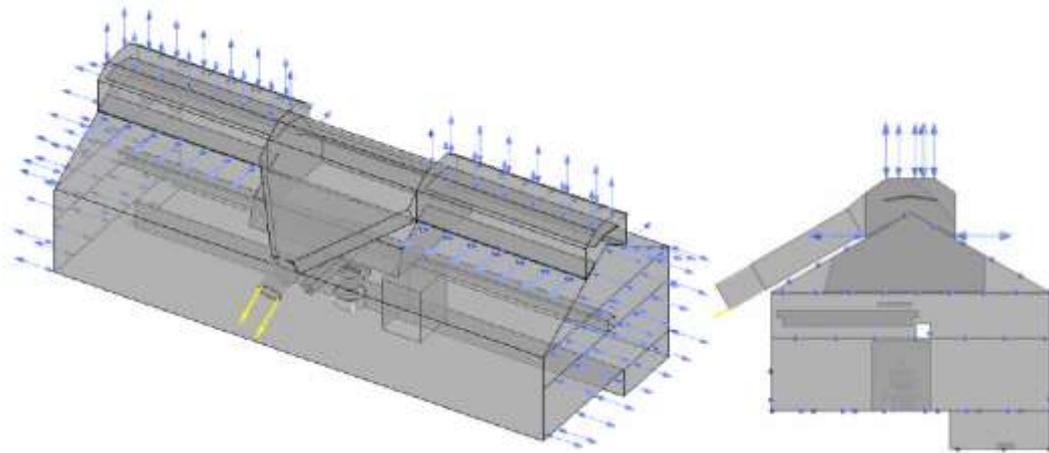


Figura 18: Geometría del modelo 7

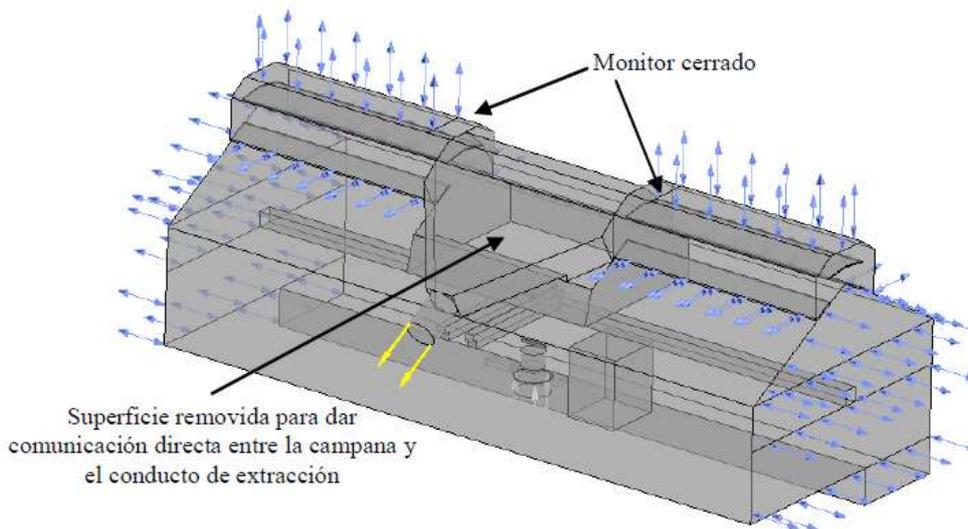


Figura 19: Geometría del modelo 8

### 3.4 Comparación de todos los modelos analizados

La [tabla 3](#) es un compendio de las tablas parciales mostradas a lo largo del informe de forma de resumir los principales resultados obtenidos con todos los modelos. En todos los casos los porcentajes corresponden al instante  $t = 140$  seg. La tabla indica el porcentaje de partículas (respecto del total inyectado) que abandonan la nave por el monitor (suma del monitor superior y el lateral) y por la succión. También se incluyen las cantidades que permanecen en el dominio computacional (*Resid*) y aquellas que permanecen en el dominio junto con las que salen del mismo a través de las paredes ficticias de la nave (*Resid+lat*). Por último se incluyen las longitudes y tiempos promedio para las trayectorias de las partículas. Es posible analizar los resultados desde varios puntos de vista o criterios de análisis a saber:

- % de partículas residuales en la nave
- % de partículas que abandonan la nave hacia el medio ambiente exterior (monitor)
- % de partículas que son captadas por el sistema secundario de extracción

Al utilizar el primer criterio puede concluirse que a igual caudal el modelo 2 tiene una leve mejoría respecto del modelo 6. El incremento en el caudal de succión para una misma

geometría, como es el caso de los modelos 2, 4 y 5, reduce aún más la polución interna de la nave. En este punto debe notarse que, ya sea con el modelo 2 o con el modelo 6, la reducción en el porcentaje de partículas residuales respecto de las que se obtienen con el modelo original 1 resulta notable. A esto hay que sumar el hecho de que la mayor parte de dichas partículas se halla en la parte superior de la nave.

Si se emplea el segundo criterio de análisis, es decir considerando las partículas que escapan por el monitor, en este caso el modelo 2 reduce dicho porcentaje a la mitad respecto de la condición actual (modelo original 1). Esta reducción es levemente menor para el modelo 6. Por último, el tercer criterio de análisis indica que el modelo 2 incrementa a más del doble la captación de partículas respecto del modelo original 1. Una mejora algo mayor muestra el modelo 6. En este sentido, el incremento en el caudal de aspiración desde  $7 \times 10^5$  a  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h significa triplicar el caudal (incremento del 200%), mientras que la captación de partículas se incrementa aproximadamente un 150%. A partir de la observación y comparación de las trayectorias de aquellas partículas que salen por el monitor se observa que el modelo 2 es más eficiente que el 6 al encauzar las partículas dentro de la campana, aunque gran parte de las mismas luego salen de ella. Por otro lado, la campana en el modelo 6 no logra captar muchas partículas, y éstas se dirigen en forma directa al monitor. Luego, puede concluirse que un diseño que coloque la succión en forma localizada en la parte superior de la campana ayuda a encauzar las partículas dentro de la misma. Aunque, si esta no posee la forma apropiada, las partículas rebotarán en sus paredes y saldrán de la misma. Por ello se recomienda un diseño nuevo donde la captación se ubique lo más arriba posible y con curvas suaves evitando cambios de dirección abruptos que originen el choque de las partículas contra las paredes.

Medidas promediadas							
Periodo = 0-140 seg. 3159 partículas							
Modelo	Caudal Succión	Long prom(m)	Tiempo prom (s)	Resid Nº part. %	Resid +lat. Nº part. %	Exterior	Succión
Orig. 1	$7 \times 10^5$	179.2	34.0	7.5	18.4	55.0	26.6
Orig. 2	$15 \times 10^5$	167.3	30.4	7.2	13.1	41.2	45.7
Mod 1	$15 \times 10^5$	183.2	35.1	8.5	15.7	35.0	49.2
Mod 2	$21 \times 10^5$	170.6	28.1	4.1	7.2	27.0	65.6
Mod 3	$21 \times 10^5$	180.6	39.1	16.7	32.1	0.00	67.6
Mod 4	$30 \times 10^5$	154.7	21.2	2.3	3.9	18.0	78.1
Mod 5	$39 \times 10^5$	151.8	18.1	1.4	2.5	12.4	85.1
Mod 6	$21 \times 10^5$	171.3	29.7	4.9	9.9	28.1	62.0
Mod 7	$21 \times 10^5$	174.7	31.5	5.3	9.3	28.1	62.6
Mod 8	$21 \times 10^5$	169.7	29.7	5.8	13.0	24.1	62.9
Mod 9	$30 \times 10^5$	169.7	29.7	5.8	15.3	11.5	73.2
Mod 10	$30 \times 10^5$	193.5	46.2	12.5	23.0	2.5	74.5
Mod 11	$21 \times 10^5$	203.9	56.9	17.5	32.4	4.8	62.8

Tabla 3: Porcentaje de partículas que permanecen en el interior, que escaparon al exterior y que fueron captadas por el sistema de extracción

Respecto de la condición actual (modelo original 1). Esta reducción es levemente menor para el modelo 6. Por último, el tercer criterio de análisis indica que el modelo 2 incrementa a más del doble la captación de partículas respecto del modelo original 1. Una mejora algo mayor muestra el modelo 6. En este sentido, el incremento en el caudal de aspiración desde  $7 \times 10^5$  a  $21 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h significa triplicar el caudal (incremento del 200%), mientras que la captación de partículas se incrementa aproximadamente un 150%. A partir de la observación y

comparación de las trayectorias de aquellas partículas que salen por el monitor se observa que el modelo 2 es más eficiente que el 6 al encauzar las partículas dentro de la campana, aunque gran parte de las mismas luego salen de ella. Por otro lado, la campana en el modelo 6 no logra captar muchas partículas, y éstas se dirigen en forma directa al monitor. Luego, puede concluirse que un diseño que coloque la succión en forma localizada en la parte superior de la campana ayuda a encauzar las partículas dentro de la misma. Aunque, si esta no posee la forma apropiada, las partículas rebotarán en sus paredes y saldrán de la misma. Por ello se recomienda un diseño nuevo donde la captación se ubique lo más arriba posible y con curvas suaves evitando cambios de dirección abruptos que originen el choque de las partículas contra las paredes.

#### 4 CONCLUSIONES

En líneas generales puede decirse que los modelos 2, 4 y 9 resultan ser los más impactantes en cuanto a mejorar tanto la polución exterior como la interior. Resulta claro que los modelos 4 y 9 poseen ventaja respecto al modelo 2 por el incremento en el caudal de succión aplicado. Es decir qué si se dispone de un caudal de succión tan elevado entonces la decisión sobre cuál de ambos adoptar recaerá en si se desea priorizar la reducción en la polución interior o la exterior. En el primer caso, es decir priorizando las condiciones interiores, el modelo 4 resulta más efectivo que el modelo 9. Por otro lado, si lo que se desea es reducir más significativamente la polución exterior, entonces el cierre parcial del monitor claramente redundará en mejores resultados (modelo 9). Si el caudal de succión a aplicar ronda los  $2.1 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h entonces no sería recomendable cerrar el monitor en forma casi total (modelo 11) ya que las condiciones interiores se verán fuertemente deterioradas incluso respecto a la condición actual. Para este caudal gran parte del monitor deberá permanecer abierto para no enrarecer demasiado el ambiente interior de la nave.

Observando la tabla se advierte que las tres opciones mencionadas (modelos 2, 4 y 9) mejoran en mayor o menor medida las condiciones tanto interior como exterior respecto de la actual. La decisión sobre que diseño priorizar dependerá de la capacidad de aspiración disponible para la nueva instalación. De acuerdo a lo observado, una mejora significativa en ambos sentidos solo parece obtenerse incrementando el caudal a valores cercanos a  $30 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h. De no ser esto posible, un modelo similar al modelo 2 sería una solución recomendable

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al CONICET, la Universidad Nacional del Litoral y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por su apoyo económico a través de los proyectos PICT 1645 BID (2008) y CAI+D 65-333 (2009)). Un especial agradecimiento al Ing. García Marquez y Beltramone por la colaboración a este trabajo

#### REFERENCES

- Kickinger R., Gittler P., Javarek M. And Lehner J., Ventilation and dedusting of melting shops, *Sec. I. Conf. CFD in Minerals and Process Industries CSIRO*, 1999.
- Kirschen M., Velikorodov V. and Pfeifer H., Mathematical modelling of heat transfer in dedusting plants and comparison to off-gas measurements at electric arc furnaces, *Energy* Volume 31, Issue 14, 2926–2939, 2006
- OpenCFD-OpenFOAM®, The Open Source CFD Toolbox, *User Guide*. OpenCFD Ltd., 2009 ANSYS-CFX, <http://www.ansys.com/Support/Documentation>