

## VALIDACIÓN DE UN MODELO DE EVACUACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN EN CONDUCTOS COLECTIVOS DE EDIFICIOS

Oscar F. Farías Fuentes\*, Françoise M. Jara Bastías\* y Róbinson E. Betancourt Astete<sup>^</sup>

\*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.  
Casilla 160-C, Concepción, Chile. ofarias@udec.cl

<sup>^</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de la Frontera.  
Temuco, Chile, rbeta@ufro.cl

**Palabras claves:** Modelo, Combustión, Gas, Chimeneas, Tiro Natural, Edificios.

**Resumen.** *En el contexto de modernización de la normativa chilena relativa a instalaciones interiores de gas, y dados múltiples casos de intoxicación por inhalación de CO en edificios equipados con conductos colectivos de tiraje natural, surge la necesidad de validar un software que permita abordar el diseño de estos sistemas en forma segura y de acuerdo a la realidad constructiva nacional. El presente trabajo presenta los avances respecto a modelos preliminares y la validación mediante ensayos en conductos de prueba que simulan edificios de 3 y 5 pisos. La versión actual del software, desarrollado en Visual Basic, resuelve los sistemas de ecuaciones no lineales utilizando Newton-Rapson Multivariable e incorpora un método iterativo que permite independizarse de hipótesis respecto a la ventilación inferior del conducto. También considera un análisis de la transferencia de calor entre los componentes del conducto y el ambiente, incluyendo factores como el viento y la radiación solar. Por otra parte, se introduce el valor del tiro en el conducto secundario, siendo éste un dato relevante en las pruebas de certificación de dichos sistemas. Los resultados experimentales muestran concordancia con la modelación en término de las evoluciones de temperatura de los gases y la presión estática en el conducto.*

## 1 INTRODUCCION

El problema de la evacuación de gases en los conductos colectivos de edificios, cobra relevancia en Chile debido a múltiples accidentes en departamentos originados por problemas de mal funcionamiento de artefactos a gas, tales como la intoxicación por monóxido de carbono. Esto queda en evidencia con la puesta en marcha del proceso de inspecciones periódicas, establecidas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles<sup>1</sup>, donde el año 1999 de un total de 1574 edificios inspeccionados en la Región Metropolitana un 44% presentaba problemas críticos, que ameritaban el corte de suministro de gas (sello rojo)<sup>2</sup>.

Actualmente el diseño y construcción de conductos colectivos en edificios se rigen por el Decreto Supremo N°222<sup>3</sup>, el cual entrega valores de áreas mínimas para los conductos según potencia instalada. No obstante, para lograr diseños que aseguren una correcta evacuación de gases, se deben considerar parámetros específicos asociado a las características constructivas y ambientales de la región. En particular, se debe tener la precaución que los artefactos funcionen con un tiraje adecuado y que el agua en estado vapor que llevan los gases no condense y comience a precipitar por el conducto dañando los materiales de construcción.

En modelos preliminares<sup>4,5,6</sup> se concluye que la sección de conductos dada por el Decreto Supremo N°222 estaría subdimensionada. Este aspecto ha sido expuesto ante un comité de estudio sobre el mejoramiento de las Instalaciones Interiores de Gas, que se encarga de la elaboración de un nuevo Código del Gas<sup>7</sup>. En la documentación preliminar se propone el diseño de conductos colectivos establecido en la Norma Italiana<sup>8</sup>, los cuales difieren significativamente del sistema que se utiliza en Chile y refuerza la tesis del subdimensionamiento de éstos.

De lo anterior, la importancia del desarrollo y validación de un software que permita evaluar diferentes formas constructivas, otorgando la seguridad necesaria para que los sistemas operen en forma correcta. Se deben considerar factores ambientales para distintas regiones del país tales como la temperatura de invierno, el viento y la radiación solar, las que afectan transferencia de calor. En el presente artículo se mostrarán los primeros resultados conducentes a la validación de un modelo teórico mejorado a través de experiencias, desarrolladas en un conducto de prueba.

## 2 ANÁLISIS TEÓRICO DE LA EVACUACIÓN DE GASES EN EDIFICIOS

### 2.1 Elementos de un Conducto Colectivo

Un conducto colectivo para evacuación de gases en edificios se compone de los siguientes elementos que se ilustran en la Figura 1.a: conducto primario o principal, conducto secundario que actúa como nexo de unión entre el artefacto a gas y el conducto colectivo, ventilación inferior y sombrerete.

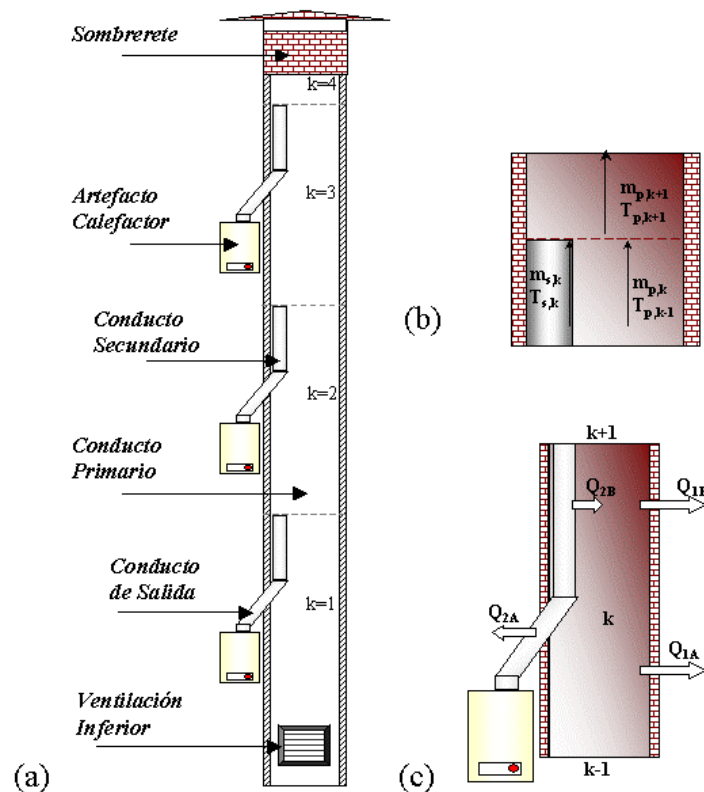


Figura 1: (a) Esquema de un conducto colectivo. (b) Mezcla de gases en la descarga del secundario. (c) Calores transferidos por los conductos

## 2.2 Modelación de los conductos colectivos

En el planteamiento de las ecuaciones del modelo, se ha considerado un volumen de control definido por elementos discretos equivalentes a un piso del edificio. Cada elemento (k) comprende el tramo desde la salida del conducto secundario del piso anterior k-1 y termina en el extremo del conducto secundario del piso en cuestión (Figura 1.c). El elemento del primer piso constituye un caso particular ya que incluye la ventilación inferior.

Para la determinación de la mezcla de flujos gaseosos que escurren a través de las diferentes secciones del conducto, se realiza un análisis a partir de las ecuaciones de combustión en cada equipo calefactor, en conjunto con la ecuación de la continuidad aplicada a la salida de los conductos secundarios (Figura 1.b) y en los artefactos para considerar la infiltración de aire a través del cortatiro. El flujo de la mezcla gaseosa ( $m_s$ ) que ingresa al conducto colectivo estaría dada por la ecuación (1), que depende de características del artefacto como potencia (N), coeficiente de dilución ( $\alpha$ ), rendimiento ( $\eta$ ), poder calorífico del combustible (PCI), la relación aire combustible estequiométrica ( $\phi_{est}$ ) y el exceso de aire (e).

$$\dot{m}_{s,k} = \frac{N \cdot \alpha}{\eta \cdot PCI} [1 + \phi_{est} (1 + e)] \quad (1)$$

Para obtener la distribución de temperaturas, se realizan balances de energía en los artefactos y en las zonas de mezclas. En el caso de los artefactos se utiliza el valor del rendimiento térmico como dato de entrada en la ecuación dada por el método indirecto. El modelo incluye las pérdidas por transferencia de calor a lo largo de los elementos del conducto, considerando la interacción entre el conducto primario con los secundarios y con el ambiente (exterior e interior), tal como se ilustra en la Figura 1.c. La ecuación (2) presenta el balance de energía que incluye los calores transferidos en cada sección del conducto.

$$Q_{1A,k} + Q_{1B,k} - Q_{2B,k} = \sum_{j=1}^4 m_{j,k} [h_j(T_{p,k+1}) - h_j(T_{p,k})] \quad (2)$$

Los flujos de calor de cada singularidad del conducto se obtienen mediante la ecuación de transferencia de calor (3), que considera la diferencia de temperatura media logarítmica  $\Delta T_{ml}$  para flujos paralelos. De esta forma se llega a un sistema de ecuaciones no lineales cuya resolución se aborda utilizando el método de Newton-Rapson Multivariable.

$$\begin{aligned} Q_{ij,k} &= U_{ij,k} \cdot A \cdot \Delta T_{ml} & i=1,2 \\ U_{ij,k} &= f(\text{geometría}, Nu, Re, k, \text{viento}, \dots) & j=A, B \\ & & k=1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

La distribución de presiones (p) en los distintos puntos del conducto se obtiene a partir de la ecuación de la energía aplicada a pequeños trozos de chimenea, donde para el tiro en un punto queda determinado en función del valor de la presión en la sección del tramo de conducto aguas abajo k+1. Para los elementos de un conducto primario se aplica la ecuación (4), con  $i=p$  para el conducto primario y  $i=s$  para el secundario.

$$p_{i,k} = p_{i,k+1} + L \cdot \bar{\rho} \cdot g - \bar{\rho} \left( \frac{v_{i,k+1}^2}{2} - \frac{v_{i,k}^2}{2} \right) - \frac{\bar{v}_i^2}{2} \bar{\rho} \left( f \frac{H}{D} + \sum k \right) \quad (4)$$

### 2.3 Descripción del programa

El programa se realizó en Visual Basic 6.0, debido a su facilidad para crear softwares ejecutables para Windows. Pese a ello, como el lenguaje Basic no contiene algunas funciones matemáticas, fue necesario codificar un módulo que incluyera funciones específicas y polinomios de propiedades termofísicas de los gases como entalpía, capacidad calorífica, densidad, conductividad, viscosidad, que en general dependen de la temperatura y concentración de cada uno de los componentes de la mezcla.

Para resolver las ecuaciones se deben ingresar las características generales del conducto colectivo, datos geográficos e información sobre accesorios tales como la ventilación y el sombrerete (Figura 2). Además se debe ingresar información del conducto colectivo relativa a su geometría y materiales de construcción (Figura 3), y por último se deben conocer características técnicas del equipo como potencia y tipo de combustible (Figura 3).

Conocidos los parámetros de entradas se establecen condiciones iniciales para el cálculo de las propiedades termofísicas, números adimensionales, flujos másicos, velocidades, temperaturas, y presiones de la mezcla de gases en las distintas secciones y puntos del

conducto colectivo. En particular, para determinar la infiltración de aire en la ventilación inferior se establece como condición inicial una depresión de 15 Pa. Otra condición inicial está dada por el flujo de aire que entra por cortatiro, para lo cual se considera un coeficiente de dilución<sup>5</sup>  $\alpha=1,2$ . Este parámetro indica la razón entre el flujo de gases después de cortatiro y el flujo de gases proveniente del artefacto.

Figura 2: Ventana de entrada de datos del conducto colectivo.

Figura 3: Ventana de datos para conductos de características homogéneas.

La Figura 4 presenta un diagrama de flujo simplificado del programa, según el cual se procede a un cálculo iterativo cuya convergencia ha sido fijada de acuerdo a criterios prácticos para el flujo de aire que ingresa por el cortatiro

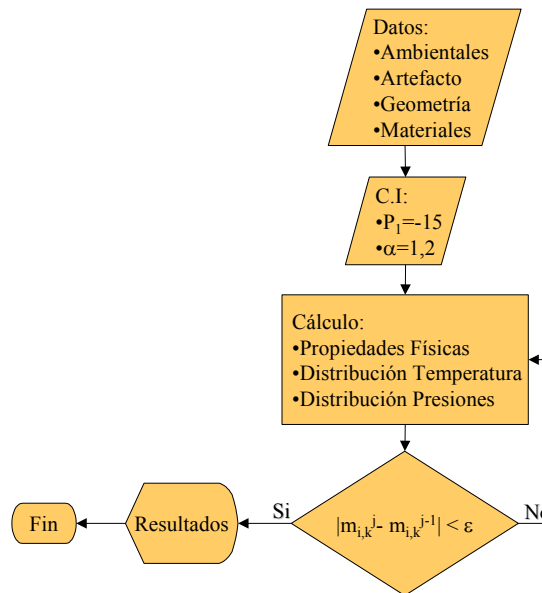


Figura 4: Diagrama de flujo del programa.

### 3 VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DESARROLLADO.

Para validar el modelo teórico del presente trabajo, se realizaron ensayos en el laboratorio de Combustión de la Universidad de la Frontera. Para ello, en una primera etapa, se construyó un banco de simulación de un edificio de tres pisos con un artefacto conectado por piso al conducto colectivo. En una segunda etapa, se añadieron dos pisos adicionales para simular una condición acorde con la edificación de tipo social desarrollada en el país.

A continuación se analizan las evoluciones de temperatura y presión a través del conducto colectivo para los casos señalados.

#### 3.1 Resultados en un conducto de tres pisos

La Figura 5 muestra la comparación de las temperaturas obtenidas a través del conducto primario, mediante el modelo y en forma experimental<sup>5</sup> para condiciones de máxima carga, con todos los artefactos en funcionamiento. Los ordenes de magnitud obtenidos según el modelo son similares a los resultados experimentales. La diferencia observada a la salida del secundario del primer piso se explica por la homogenización de la mezcla que en la práctica, a diferencia de la hipótesis del modelo, no es instantánea. Este aspecto se aborda actualmente mediante una simulación numérica con el software CFD Fluent.

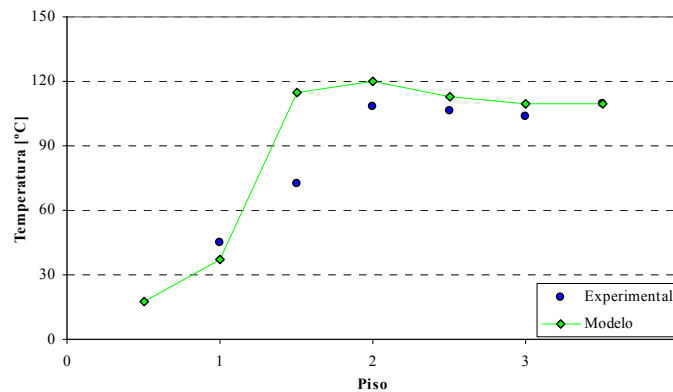


Figura 5: Evolución de temperaturas en el conducto primario (tres pisos).

En cuanto a la evolución de tiraje en el conducto colectivo (Figura 6), los resultados obtenidos con el programa están dentro de los límites de error experimental y para el caso analizado se tiene una depresión aceptable a través del conducto.

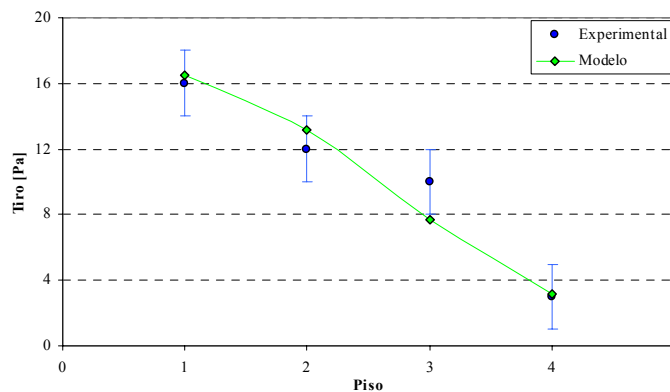


Figura 6: Evolución de tiraje en el conducto primario (tres pisos).

La Figura 7 muestra una comparación entre los resultados del modelo y las mediciones de tiraje efectuadas en el conducto secundario, de acuerdo a procedimiento del proceso de certificación de instalaciones interiores a gas<sup>1</sup>. En ambos casos, el tiraje decrece a medida que aumenta la altura en que se localiza el artefacto. Esto produce diferencias operacionales asociadas a las emisiones de CO y al rendimiento. Aunque la presente aplicación no presenta problemas de emisiones, en general este aspecto resulta crítico para los artefactos instalados en los últimos pisos. En términos comparativos, el modelo presenta valores de tiro levemente inferiores a los experimentales. En el caso del primer piso, la mayor diferencia en los resultados se atribuye a defectos en el intercambiador de calor del artefacto, lo cual tiene incidencia en los parámetros ingresados al programa.

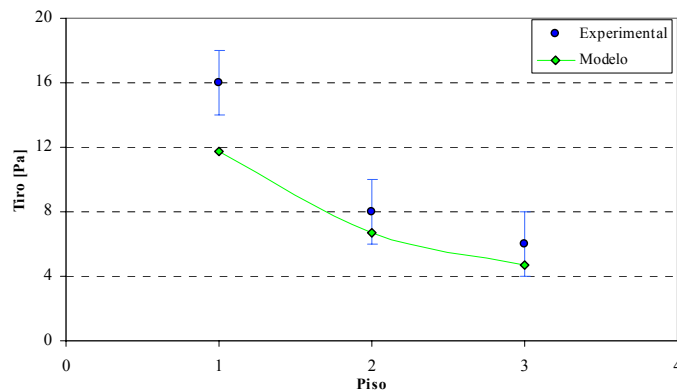


Figura 7: Tiraje después de cortatiro para los distintos artefactos (tres pisos).

### 3.2 Resultados en un conducto de cinco pisos

Con el fin de incluir experiencias acorde con las inspecciones según la reglamentación chilena se realizaron ensayos a carga mínima (artefacto primer piso encendido a potencia mínima) y carga máxima (todos los artefactos a potencia máxima).

En la Figura 8, al comparar las distribuciones de temperatura del flujo gaseoso al interior del conducto colectivo se aprecia una sobreestimación de los resultados del modelo con una diferencia promedio de 16°C. Esta diferencia sobre las mediciones se atribuye a una subestimación de las infiltraciones de aire en el conducto y en la ventilación inferior, puesto que estas variables son difíciles de controlar en el ambiente del laboratorio. De todas formas los resultados del programa siguen la tendencia esperada. El problema que surge bajo esta condición de funcionamiento (carga mínima) está relacionada con temperaturas a la salida del conducto inferiores al punto de rocío (aproximadamente 50°C<sup>9</sup>), lo cual podría dar origen a precipitación del vapor agua al interior del conducto.

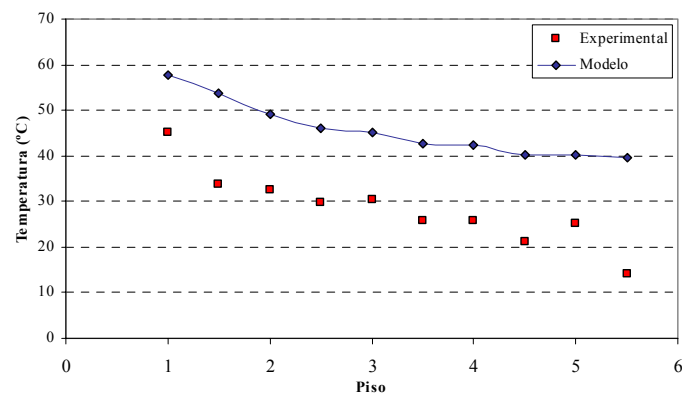


Figura 8: Evolución de temperatura en el conducto colectivo a carga mínima (cinco pisos).

En la Figura 9, se puede observar que la distribución de tiraje en el conducto colectivo se encuentra en el rango de incertidumbre dada por las mediciones.



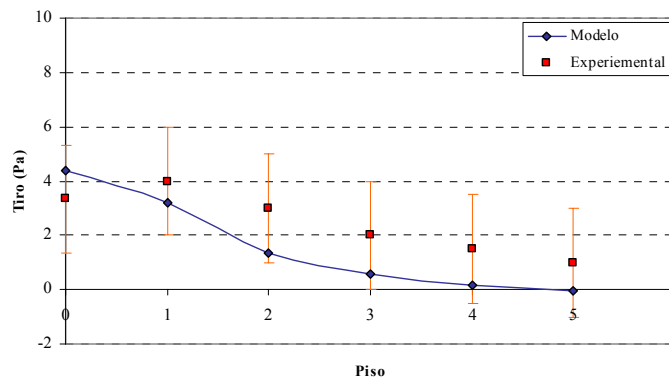


Figura 9: Evolución del tiraje en el conducto colectivo carga mínima (cinco pisos).

La experiencia de carga máxima tiene como objeto verificar si el conducto colectivo es capaz de evacuar la cantidad máxima de gases producida bajo esa condición, para lo cual se esperaría que el tiro en los últimos artefactos sea mayor a 2 Pa. En la Figura 10 se puede observar que la distribución de temperaturas a través del conducto sigue una tendencia variable, según la cual se eleva cada vez que recibe flujo de un conducto secundario y se enfría debido a la transferencia de calor hacia el exterior. La distribución dada por el modelo se encuentra desfasada, debido a que éste calcula al inicio de cada piso una temperatura de mezcla instantánea, lo que no ocurre en la realidad puesto que la homogeneización de la mezcla es paulatina. El rango de temperaturas presenta un error absoluto promedio de 15°C.

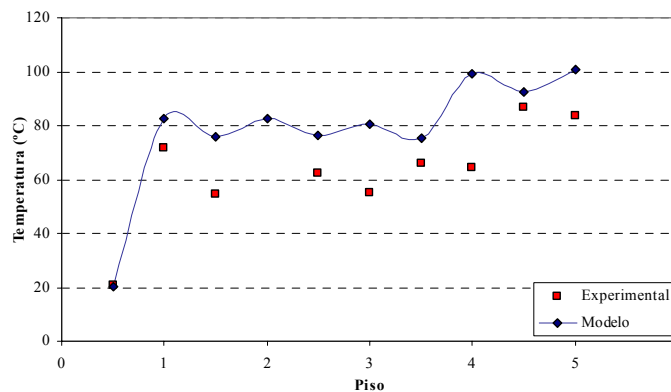


Figura 10: Evolución de temperaturas en el conducto primario carga máxima (cinco pisos).

En cuanto al cálculo del tiraje en el conducto colectivo (Figura 11), los valores estimados por el modelo y los medidos son casi idénticos presentando un error absoluto promedio de 0,35 Pa.

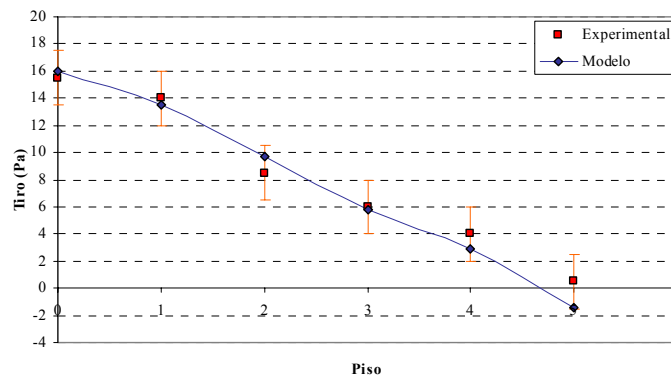


Figura 11: Evolución del tiraje en el conducto colectivo carga máxima (cinco pisos).

Al igual que en el conducto colectivo, el programa muestra una buena estimación de los valores de tiro en el secundario (Figura 12). Cabe destacar que tanto el modelo como las mediciones acusan problemas de tiraje en el artefacto del quinto piso, lo cual constituye un riesgo potencial de intoxicación por monóxido de carbono para hipotéticos habitantes de dicho departamento. Este resultado concuerda con las restricciones de la normativa italiana<sup>8</sup> que permita construcción de conductos para edificios hasta cinco pisos con el último artefacto descargando directamente al exterior.

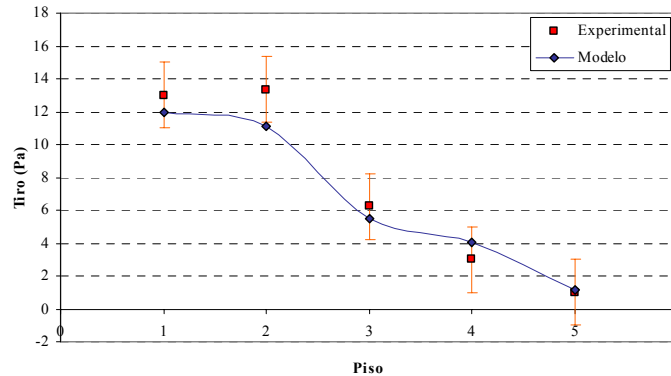


Figura 12: Evolución del tiro en el conducto secundario carga máxima (cinco pisos).

#### 4 CONCLUSIONES

El software desarrollado permite simular variadas situaciones en un ambiente gráfico amigable, incluyendo características técnicas y ambientales propias de la región. La modelación teórica incluye suficiente detalles relativos a la transferencia de calor y escurrimiento de la mezcla gaseosa a través de los diferentes componentes del sistema.

Los resultados relativos a las evoluciones de temperatura y presión a través del conducto colectivo muestran concordancia con los resultados experimentales. Las diferencia en cuanto

a niveles de temperatura se pueden atribuir a un escaso manejo de variables externas asociadas a corrientes de aire principalmente.

En cuanto a las implicancias prácticas, el modelo predice en forma eficiente potenciales problemas de evacuación debido a tiraje deficiente. También da lugar a la optimización en diseños existentes.

En una próxima etapa se proyectan nuevas experiencias para identificar factores de tipo ambiental como el efecto de los vientos y se modelarán singularidades en las zonas de mezcla y sombrerete con CFD Fluent.

## 5 AGRADECIMIENTOS

El trabajo experimental se desarrolla con financiamiento de la dirección de investigación de la Universidad de la Frontera DIUFRO, proyecto N°120220. El modelo computacional fue desarrollado gracias al programa “Financiamiento Tesis Universitarias III” del Gobierno Regional, VIII Región-Chile.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, “Resolución Exenta N°489”, Santiago, Chile, 1999
- [2] Farias Oscar, “Problemática de las instalaciones de gas en edificios”, Revista de Ingeniería, Universidad de Concepción, Año 43-N°1, junio 2001.
- [3] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Decreto Supremo N°222, “Reglamento de Instalaciones Interiores a Gas”, Santiago, Chile, 1996.
- [4] Tartari Paula, “Diseño de Conductos de Evacuación de Gases en Edificio”, Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2000.
- [5] Torres Eugenia, “Estudio experimental sobre la Evacuación de Humos en conductos Colectivos de Edificios”, Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2001.
- [6] Jara Françoise, “Validación de un Modelo Teórico para la Evacuación de Gases en Conductos Colectivos”, Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2003.
- [7] Gamma Ingenieros S.A, “Propuesta para un Nuevo Reglamento de Instalaciones de Gas”, Santiago, Chile, 2001.
- [8] Norma Italiana UNI 10640, “Canne fumaire collettive ramificate per apparecchi di tipo B a tiraggio naturale”, Proyección y verificación, Italia, 1999.
- [9] Association Royale des Garies Belges, “Manual des Utilisations du Gaz Naturel”, Editions Demol, Bélgica, 1997.