



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A095

## Análisis de la producción de la voz por golpe de Ariete

Denisse Sciamarella<sup>(a)</sup>,  
Guillermo Artana<sup>(b)</sup>.

(a) LIMSI-CNRS, Orsay, Francia.

(b) Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Argentina.

### Abstract

The pressure rise produced in the subglottal tract by glottal closure during vocal fold vibration causes a flow transient which is analogous to a water hammer phenomenon in a pipe flow. Water hammer theory has been advocated in voice production to compute the acoustic impedance looking into the trachea or in methods for tracheal wall motion detection, but has not been previously applied to predict the acoustic waves in the human airways during phonation.

In this article, we present an analysis of the phonation system from the basic equations and the conventional numerical methods used in water hammer theory. This approach to the problem is used to predict pressure and flow oscillations for a glottal valve operation extracted from recent *in vitro* experiments. The analysis has the advantage of accounting for voice generation without the *ad hoc* introduction of source models based on acoustic analogies. It also admits interesting prospects of application to physics-based articulatory synthesis.

### Resumen

El salto de presión producido en el tracto subglotal por el cierre de la glotis durante la vibración de las cuerdas vocales provoca un transitorio en el flujo de aire análogo al que se produce en los fenómenos de golpe de Ariete en conductos a presión. La teoría de golpe de Ariete ha sido vinculada con la producción vocal para la estimación de la impedancia acústica de la tráquea o en métodos de detección de vibraciones de la pared traqueal, pero no ha sido aplicada para predecir las ondas acústicas en las vías aéreas durante la fonación.

En este trabajo se presenta un análisis del sistema fonador a partir de las ecuaciones básicas y los métodos numéricos tradicionales de la teoría de golpe de Ariete. Esta aproximación al problema permite predecir las oscilaciones de la presión y el flujo de aire para una operación de la válvula glotal extraída de recientes experiencias *in vitro*. Este enfoque permite dar cuenta de la generación de la voz sin la introducción *ad hoc* de modelos de fuente sonora basados en analogías acústicas. Asimismo, el análisis por golpe de Ariete admite interesantes perspectivas de aplicación a sistemas de síntesis articulatoria por modelo físico.

## 1 Introducción

Muchos radiadores acústicos se comportan como esferas pulsantes si sus dimensiones son pequeñas con respecto a la longitud de onda del sonido producido, al menos en primera aproximación. Este es el caso del flujo inducido por la vibración de las cuerdas vocales para el sistema de producción de la voz. Por este motivo, la mayor parte de los modelos de producción vocal introducen un modelo de fuente sonora de tipo esfera pulsante (monopolo acústico) para dar cuenta de la presión acústica que se origina en la glotis (el espacio definido entre las cuerdas vocales) y que será posteriormente afectada por la configuración (estática o dinámica) del tracto vocal. Si bien la adopción del monopolo acústico para los modelos simples de fuente vocal es unánime, hay una dispersión considerable en la expresión final que relaciona el flujo o caudal glotal con la presión acústica resultante. La razón es que las soluciones aproximadas difieren significativamente según las hipótesis utilizadas. Ahora bien, si las propiedades aerodinámicas del flujo a través de las cuerdas vocales pueden ser determinadas experimentalmente, y si estas propiedades pueden condensarse en una ley que contenga los efectos de la acción mecánica de las cuerdas vocales (operación de la válvula glotal), entonces el problema toma el cariz de los problemas básicos que trata la teoría de golpe de Ariete.

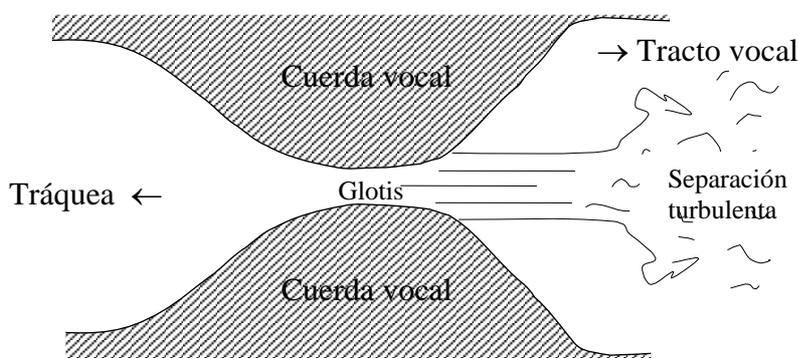
Esta teoría describe los transitorios de los fluidos en conductos [Wylie & Streeter, 1993]. Se conoce como flujo de golpe de Ariete a la forma oscilatoria de un fluido no estacionario que se genera por los cambios que produce, por ejemplo, la rápida apertura o cierre de una válvula. El análisis convencional por golpe de Ariete provee información, bajo ciertas condiciones operacionales, sobre dos incógnitas: la presión y la velocidad en función del espacio y el tiempo. La fuente de los transitorios (en nuestro ejemplo, la apertura y el cierre de la válvula) suele tratarse como una condición cinemática para el fluido, tal como sucede en los problemas de aeroelasticidad. Efectos tales como la fricción no estacionaria, la radiación acústica al exterior o la interacción fluido-estructura no son considerados en el problema clásico de golpe de Ariete, a diferencia de lo que ocurre en la teoría de golpe de Ariete extendida [Skalak, 1956], que incluye mecanismos que actúan tanto a lo largo de todo el conducto como en puntos específicos (válvulas no controladas, codos u obstáculos). En el sistema de producción vocal, las cuerdas vocales actúan como una válvula en un 'punto' de las vías aéreas (la glotis), con acciones repetitivas de compresión y descompresión [Fletcher, 1993]. La analogía entre el sistema tráquea-glotis y el sistema conducto-válvula es natural y directa. De hecho, ya en 1976 Ishizaka, uno de los autores del modelo físico más célebre de las cuerdas vocales [Ishizaka & Flanagan, 1972], aludió a la posibilidad de calcular la impedancia acústica de la tráquea como en un problema de golpe de Ariete [Ishizaka, 1976]. La teoría de golpe de Ariete ha sido posteriormente utilizada en métodos de detección de las vibraciones de la pared traqueal [Burnett, 2002]. La extensión de la analogía al sistema supraglotal es posible si, como es frecuente, se modela el tracto vocal como una serie de tubos de sección variable. La analogía extendida permite tratar al sistema fonador como una línea de fluido interceptada por una válvula y habilita la aplicación de la teoría de golpe de Ariete a todo el sistema fonador. El objetivo en este trabajo es presentar ejemplos de aplicación de la teoría básica de golpe de Ariete al caso de la producción de la voz y resaltar los aspectos interesantes que surgen de esta perspectiva.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Modelización de la producción vocal

El aire que circula a través de la glotis se comporta como un fluido localmente incompresible con separación turbulenta (ver figura 1) [Pelorson *et al*, 1994]. El tracto vocal, sucesivo a la glotis, actúa básicamente como un filtro o un resonador. El fluido en el tracto es compresible y descriptible en términos de la ecuación de Euler linealizada o simplemente con la ecuación de ondas planas. Debido a la disparidad de las características del flujo en la fuente y en el tracto, ambos suelen estudiarse como dos subsistemas separados y conectados por una relación entre el flujo glotal y la presión acústica generada. El acople con la tráquea es considerado en algunos trabajos aislados y no de manera sistemática. Así, el subsistema tracto da cuenta de la propagación de una presión acústica previamente generada, y el subsistema fuente da cuenta del movimiento no acústico del fluido en la glotis. Un modelo auxiliar es, pues, necesario para predecir la generación del sonido en la conexión entre la fuente y el tracto. Este modelo auxiliar es un modelo de fuente que se introduce *ad hoc*. El acento en estos modelos está puesto en la dinámica de las cuerdas vocales y en la transmisión del sonido.

El análisis que se propone a continuación, en cambio, permite reunir la aerodinámica de la producción vocal en un único sistema prediciendo la generación y la propagación de las ondas acústicas supraglóticas y subglóticas, sin la introducción de un modelo de fuente y mediante un procedimiento bien establecido: el de la práctica de golpe de Ariete.



**Figura 1.** Flujo de aire a través de las cuerdas vocales.

### 2.2 La teoría de golpe de Ariete

Muchos autores han contribuido a la teoría de golpe de Ariete [Ghidaoui, 2005]. Entre ellos, Joukowsky realizó un estudio sistemático del sistema de distribución de agua en Moscú y derivó una fórmula que lleva su nombre [Joukowsky, 1900]:

$$\Delta P = \rho c \Delta v, \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{c_0^2}{1 + \frac{D_0 K}{eE}}}. \quad (2)$$

Esta fórmula relaciona las fluctuaciones de presión con los cambios de velocidad mediante un factor constante, igual al producto de la velocidad del sonido  $c$  por la densidad  $\rho$ . La expresión (2) para la velocidad del sonido en el caso de fluidos confinados fue derivada en primer lugar para predecir las ondas estacionarias en instrumentos musicales y los flujos pulsantes en arterias. Para un flujo compresible en un conducto elástico,  $c$  depende del módulo elástico del fluido  $K$ , del módulo elástico del conducto  $E$ , del radio interior del conducto  $D_0$  y del espesor de la pared del conducto  $e$ .

Las ecuaciones de golpe de Ariete son alguna versión de las ecuaciones para fluidos compresibles. La versión se elige según los requerimientos del problema. En general, se llama golpe de Ariete *básico* al problema sin fricción ni mecanismos de amortiguamiento, golpe de Ariete *clásico* al problema con fricción parietal y golpe de Ariete *extendido* al problema con movimiento del conducto e interacción fluido estructura. El método de las características es el método numérico estándar que se utiliza para resolver las ecuaciones.

La operación de la válvula en golpe de Ariete *básico* y *clásico* se incorpora al problema como un dato. Las pérdidas ocasionadas por la válvula se prescriben, en general, por medio de una ley empírica que contiene un coeficiente de ‘descarga’. Dicho coeficiente suele determinarse en condiciones de flujo estacionario, para cuantificar la respuesta del flujo y el salto de presión para cada posición de la válvula. En él se condensa la información crítica que necesita un análisis por golpe de Ariete.

En este trabajo, discutiremos la aplicación de las ecuaciones de golpe de Ariete *básico* al problema de la producción vocal. Por supuesto, el problema de la producción de la voz admite un tratamiento más complejo, pero esta aproximación nos permitirá comparar los resultados de este análisis con los que se obtienen en los modelos clásicos de vibración de las cuerdas vocales.

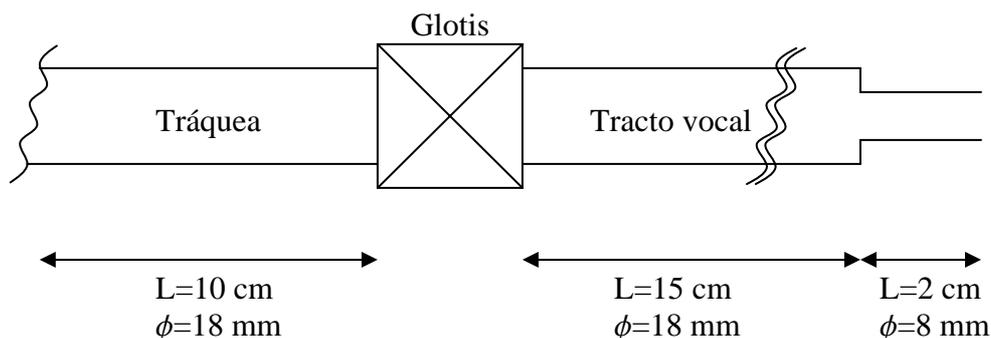
### 3 Aplicación del análisis por golpe de Ariete a la producción vocal

Consideremos pues al sistema fonador como un sistema de conductos. En principio, es posible conectar la configuración básica reservóreo-conducto-válvula (pulmones-tráquea-glotis) a diferentes tipos de configuraciones supraglotales. Una configuración realista debería incluir, por ejemplo, la cavidad ventricular definida por las bandas ventriculares (falsas cuerdas vocales) [Sciamarella *et al*, 2008], o incluso la bifurcación del tracto vocal que conduce alternativamente a la nariz o a la boca. En este trabajo, se optará por una configuración sencilla, con un tracto vocal no bifurcado y sin falsas cuerdas vocales.

La aplicación del análisis por golpe de Ariete al sistema fonador puede dividirse en tres pasos: la caracterización del conducto, la derivación u obtención de un coeficiente de descarga y la prescripción de la mecánica de la válvula. Para el conducto, adoptaremos la geometría de la figura 2, que aproxima groseramente la configuración del sistema vocal en la producción de una vocal con redondeo labial (como la vocal /u/).

Para el coeficiente de pérdidas a la salida de la válvula glotal, es posible aplicar un ley empírica extraída de experiencias *in vitro* [Mongeau *et al*, 1997] realizadas en condiciones semejantes a las que nos proponemos tratar. Esta es la opción que mejor reproduce la práctica habitual en problemas de golpe de Ariete, pero de ningún modo es la única. Como alternativa,

es también posible también apelar a una ley fenomenológica, como las que se utilizan frecuentemente en los modelos de señal [Fant, 1971]. Una tercera posibilidad es derivar un coeficiente de descarga a partir de experimentos *in silico*, como los realizados por uno de los autores de este trabajo [Sciamarella & Le Quéré, 2007]. En este caso, el coeficiente sería dinámico y contendría la historia del flujo en condiciones no estacionarias. No obstante, la operación de la válvula estaría condicionada a reproducir exactamente la que se empleó en la simulación numérica.

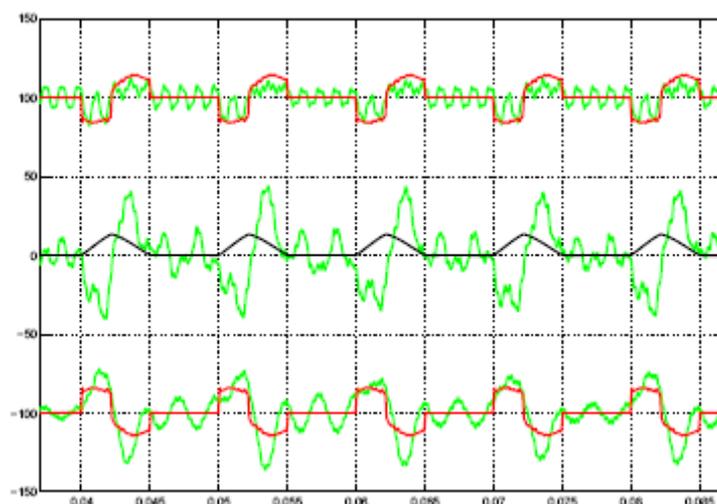


**Figura 2.** Configuración del sistema de conductos adoptado para el análisis por golpe de Ariete de la producción vocal.

Para prescribir la mecánica vibratoria de la válvula glotal, utilizaremos la ley de evolución para el área de la válvula lineal por tramos, graficada en color negro en el centro en la figura 3. Nótese que se asigna un área nula durante la fase cerrada del ciclo de oscilación de las cuerdas vocales (que colisionan y cierran el conducto). En fonación normal, la glotis permanece cerrada durante aproximadamente medio ciclo, como en el caso que hemos analizado.

Los resultados del análisis se muestran también en la figura 3. Nótese que tanto la presión subglotal como la supraglotal exhiben los efectos de la reverberación de la presión por el acople simultáneo con el tracto y la tráquea. Este efecto de retroacción se logra permitiendo que el flujo a través de la válvula sea actualizado antes de ser reconsiderado en el próximo paso de tiempo del algoritmo numérico.

En la figura 4, se muestra otro ejemplo de aplicación en el que la ley de operación de la válvula es una ley fenomenológica para el caudal glotal, tal como se lo expresa en los modelos de señal de la forma de onda glotal. Dichos modelos establecen una expresión analítica para el caudal a la salida de la glotis en función de cuatro parámetros acústicos, utilizados en la caracterización del timbre y de la intensidad vocal [Sciamarella & D'Alessandro, 2004]. Los parámetros de control utilizados en el ejemplo de la figura 4 son: el cociente de apertura (0.58), el cociente de velocidad (1.8), el cociente de fase de retorno (0.05) y la velocidad de cierre ( $64 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La frecuencia fundamental es de 100 Hz.

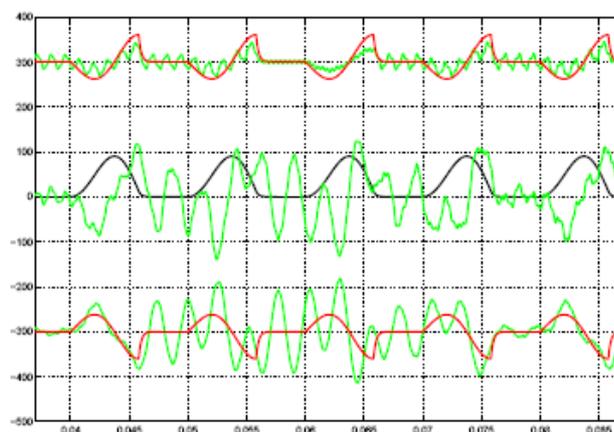


**Figura 3.** Predicciones del análisis por golpe de Ariete para la ley de operación graficada en el centro en línea negra. En las abscisas, el tiempo está expresado en segundos. En rojo, se grafica la derivada del caudal (en  $dm^3/s^2$ ) y en verde, la presión (en  $Pa$ ). El área está expresada en decenas de  $mm^2$ . Las curvas corresponden arriba a los valores supraglotales, en el centro a los valores transglotales y abajo a los valores subglotales. Los valores supra y subglotales han sido desplazados en  $\pm 100$  unidades respectivamente con el objeto de reunirlos en un único gráfico.

La ventaja de utilizar este tipo de ley es, naturalmente, la posibilidad de controlar los parámetros que determinan las características de la voz generada. No obstante, este ejemplo se aleja de la práctica estándar de golpe de Ariete, cuyo corazón es una ley de naturaleza empírica (sea el experimento que provee el coeficiente de descarga, *in vitro* o *in silico*). Por otra parte, los modelos de señal suponen separación entre fuente y filtro, razón por la cual hemos eliminado el acople fuente-filtro en el análisis por golpe de Ariete que presentamos en la figura 4. La posibilidad de activar o desactivar el acople muestra la versatilidad del tipo de análisis propuesto. Como consecuencia de la desactivación del acople, la riqueza espectral de la señal es menor, con la consecuente pérdida de naturalidad en la voz sintetizada. Nótese por último que la amplitud de la señal de presión acústica sufre en este ejemplo una lenta modulación. Este efecto puede ser atribuido al forzado del flujo que realiza la ley de operación. La sensibilidad a la ley de operación es un punto a tener en cuenta en la implementación de este tipo de análisis, que remite a los modelos de oscilación forzados de la glotis [Alipour & Scherer, 2004].

#### 4 Conclusiones

Una analogía acústica es la reducción de una fuente de sonido a un tipo de emisor simple. En los modelos tradicionales para las cuerdas vocales (inspirados en el ‘modelo a dos masas’ propuesto por Ishizaka y Flanagan en 1972), el tipo de emisor simple que se adopta para la fuente vocal es el de una esfera pulsante (monopolo acústico) [Lighthill, 1952].



**Figura 4.** Predicciones del análisis por golpe de Ariete para una ley de operación fenomenológica, correspondiente a un modelo de señal que prescribe el caudal glotal mediante una función analítica (graficada en el centro en negro). En las abscisas, el tiempo está expresado en segundos. En rojo, se grafica la derivada del caudal (en  $dm^3/s^2$ ) y en verde, la presión (en  $Pa$ ). Las curvas corresponden a los valores supraglotales en la zona superior, a los valores transglotales en el centro y a los valores subglotales en la zona inferior. Los valores supra y subglotales han sido desplazados en  $\pm 100$  unidades respectivamente para reunir las curvas en un único gráfico.

En este trabajo, presentamos un análisis de la producción vocal a partir de la teoría de golpe de Ariete, tratando al sistema fonador como un conducto interceptado por una válvula a la altura de la glotis, cuya acción corresponde a la modulación del flujo inducida por las cuerdas vocales vibrantes durante la producción de voz. El análisis es particularmente interesante porque permite predecir simultáneamente la generación y la propagación del sonido desde la tráquea hasta la boca sin recurrir a un modelo de fuente sonora.

La teoría de golpe de Ariete admite diversos grados de complejidad. Optar por su versión más sencilla permite obtener predicciones análogas a las que se realizan con los modelos tradicionales y validar esta aproximación al problema, que no había sido explorada anteriormente en el marco de la síntesis de voz. El análisis de la producción vocal por golpe de Ariete confirma, de hecho, que el modelo del monopolo acústico es adecuado para describir la fuente vocal, porque la voz es producida principalmente por la inyección periódica de aire en el tracto vocal.

Otra característica interesante del análisis propuesto es la posibilidad de tratar al sistema fonador completo, incluyendo al sistema subglotal. Para ilustrar nuestra propuesta, hemos presentado un ejemplo de aplicación que utiliza una ley de operación para la válvula glotal extraída de recientes experiencias *in vitro*. Hemos evaluado igualmente, cómo se modifica el análisis si se recurre a una ley de operación fenomenológica, como la que suele utilizarse en los modelos de señal para el flujo glotal. En ambos casos, se obtienen predicciones compatibles con las de los modelos convencionales de síntesis vocal por modelo físico. El acento de nuestra propuesta, sin embargo, no reside en la descripción de la física de las cuerdas vocales ni en cómo éstas logran oscilar de manera auto-sostenida, sino en la respuesta del flujo de aire a su acción mecánica, que da cuenta de la generación de la voz sin apelar a modelos de fuente sonora.

Esta aproximación al problema de la producción vocal encierra perspectivas de interés particularmente en síntesis articulatoria, puesto que el análisis admite la incorporación

sencilla de una geometría continua y dinámica para el tracto vocal, así como también de la bifurcación del tracto. La teoría de golpe de Ariete extendida podría igualmente proveer un procedimiento alternativo y bien establecido para analizar el problema de interacción fluido-estructura a nivel de las cuerdas vocales [Tijsseling, 1996].

## Referencias

- Alipour, F. ; Scherer, R. C. (2004). “Flow separation in a computational oscillating vocal fold model”. *Journal of the Acoustical Society of America* 116 (3) 1710–1719.
- Burnett, G. C. (2002). “Method and apparatus for voiced speech excitation function determination and non-acoustic assisted feature extraction”. United States Patent 20020099541 A1
- Fant, G.; Liljencrants, J.; Lin, Q. (1971). “A four parameter model of glottal flow”. *STL-QSPR* 4, 1–13
- Fletcher, N. H. (1993). “Autonomous vibration of simple pressure-controlled valves in gas flows”. *Journal of the Acoustical Society of America* 93 (4) 2172–2180.
- Ghidaoui, M. S.; Zhao, M.; McInnis, D. A.; Axworthy, D. H. (2005). “A review of water hammer theory and practice”, *Appl. Mech. Rev.* (58) 49–76.
- Ishizaka, K. ; Flanagan, J. L. (1972). “Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords”. *Bell. Syst. Tech. J.* (51) 1233–1268.
- Ishizaka, K.; Matsudaira, M; Kaneko, T. (1976). “Input acoustic-impedance measurement of the subglottal system”. *Journal of the Acoustical Society of America* 60 (1) 190–197.
- Joukowsky, N. (1900). “Über den hydraulischen stoss in wasserleitungsrohren”. *Mémoires de l’Académie Impériale des Sciences de St. Pétersbourg Series 8, (9) 5.*
- Kucinschi, B. R.; Scherer, R. C.; DeWitt, K. J.; Ng, T. T. M. (2006). “An experimental analysis of the pressures and flows within a driven mechanical model of phonation”. *Journal of the Acoustical Society of America* 119, 3011–3021.
- Lighthill, M. J. (1952). “On sound generated aerodynamically. I General theory.” *Proc. Roy. Soc. London. Series A* 211 (A), 564–587.
- Mongeau, L.; Franchek, N.; Coker, C. H.; Kubli, R. A. (1997). “Characteristics of a pulsating jet through a small modulated orifice, with application to voice production”. *Journal of the Acoustical Society of America* 102, 1121–1133.
- Pelorsson, X.; Hirschberg, A.; van Hassel, R. R.; Wijnands, A. P. J. (1994). “Theoretical and experimental study of quasisteady-flow separation within the glottis during phonation. Application to a modified two-mass model”. *Journal of the Acoustical Society of America* 96(6) 3416–3431.
- Sciamarella, D.; Chisari, E.; Artana, G.; Bailly, L.; Pelorsson X. (2008). “Separated flow behavior in an in-vitro rigid model of the laryngeal channel”. *Journal of the Acoustical Society of America* 123 (5) 3577
- Sciamarella, D.; D’Alessandro, C. (2004). “On the acoustic sensitivity of a symmetrical two-mass model of the vocal folds to the variation of control parameters”. *Acta Acustica* 90, 746–761.
- Sciamarella, D.; Le Quéré, P. (2007). “Solving for unsteady airflow in a glottal model with immersed moving boundaries”. *European Journal of Mechanics / B Fluids* 27/1, 42–53.
- Skalak, R. (1956). “An extension of the theory of waterhammer”. *Transactions of the ASME* 78 (1956) 105–116.
- Streeter V. L.; Wylie, V. L. (1974). “Waterhammer and surge control”. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 6, 57–73.
- Tijsseling, A. S. (1996). “Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: A review”. *Journal of Fluids and Structures* (10) 109146.
- Titze, I. R. (1994). “Principles of Voice Production”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Wylie, E. B. ; Streeter, V. L. (1993). “Fluid Transients in Systems”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.