

DETERMINACION DE LA CONFIGURACION DEL TRACTO VOCAL A PARTIR DEL ANALISIS DE FRECUENCIA DE SONIDOS VOCALICOS

A. García y L.J. Faus
*Laboratorio de Acústica
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Valencia*

Introducción

La teoría acústica de la producción del habla ⁽¹⁾ describe este proceso como la respuesta de un conjunto de filtros a una o más fuentes de sonido. En la representación simbólica de este sistema, F representa la fuente y T la función de transferencia, que en términos técnicos corresponde a la función de filtrado del tracto vocal. El producto $P=F.T$ representa el sonido resultante.

La fuente sonora F corresponde a la perturbación acústica producida por una corriente de aire procedente de los pulmones. Esta perturbación puede ser de tres tipos y en todos ellos es el resultado de la acción de una estructura articuladora que

- (a) estrecha el paso de dicha corriente generando un ruido,
- (b) frena momentáneamente dicho paso, produciéndose un sonido transitorio cuando se libera la corriente de aire, o
- (c) en el caso de sonidos periódicos, modula de forma casi periódica el flujo de aire. Obsérvese que la etapa previa necesaria para que se produzca una emisión de sonido es en cualquier caso de naturaleza aerodinámica y se basa en la existencia de una corriente de aire producida por el movimiento de espiración (o inspiración) del sistema respiratorio humano.

Por su parte, el tracto vocal, como sistema de filtros o cavidades resonantes, actúa sobre el sonido generado por las fuentes mencionadas, dándole la forma específica de sus cualidades fonéticas. El tracto vocal puede mantener una configuración relativamente abierta y actuar sólo como modulador

del tono glotal (sonidos vocálicos) o estrechar y cerrar el paso de la corriente de aire en una zona específica (sonidos consonánticos).

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar la configuración del tracto que ha articulado un cierto sonido a partir del análisis de frecuencias de dicho sonido. Este planteamiento se conoce con el nombre de "problema inverso". El problema directo consiste en predecir las características de un sonido tomando como punto de partida la configuración del correspondiente tracto vocal.

En general, el problema inverso se suele resolver mediante métodos de predicción lineal⁽²⁾. En nuestro caso, nos hemos planteado la resolución de dicho problema utilizando un método de minimización de errores, con el fin de investigar sus ventajas e inconvenientes frente a los métodos de predicción lineal. En particular, aunque los métodos de predicción lineal son mucho más rápidos, creemos que la utilización del método de minimización puede plantear algunas posibilidades interesantes en relación con los procesos de reeducación de vocales defectuosas.

El proceso completo consiste en primer lugar en el cálculo del tracto vocal con el que se articula la vocal defectuosa mediante métodos de predicción lineal. A continuación, fijamos una parte del tracto (concretamente, la parte más difícil de modificar, por ejemplo, desde la base de la lengua al glotis) y dejamos variable el resto del tracto. Finalmente, aplicamos el método de minimización para obtener la configuración de esta parte del tracto que daría lugar a un sonido vocálico de calidad aceptable.

El método de minimización no se limita a proporcionar un tracto único, sino toda una serie de posibles tractos alternativos. Como es natural, cada uno de estos tractos posee un grado de dificultad articulatoria y una calidad acústica diferentes. En este contexto, se puede plantear la interesante posibilidad de ir aumentando paulatinamente el nivel de dificultad articulatoria con el fin de ir mejorando la calidad del sonido correspondiente.

Método de trabajo

El proceso de modulación de una señal glotal es función de la configuración del tracto vocal. Esta configuración se puede caracterizar mediante un conjunto discreto de parámetros. Si utilizamos el modelo simplificado del tracto que considera a éste como un conjunto de n tubos cilíndricos de cierta longitud y sección, dicho tracto vendrá caracterizado por un conjunto de n longitudes y n secciones.

En el marco del denominado problema directo, es decir, la obtención de las resonancias del tracto a partir de su geometría, nuestro trabajo ha consistido en hacer variar las secciones de n tubos consecutivos hasta que las resonancias del tracto teórico (formantes) sean lo suficientemente parecidas a las del fonema experimental cuya configuración del tracto deseamos obtener (por simplicidad, en todos nuestros cálculos hemos mantenido constantes las longitudes de los n tubos del tracto).

La dificultad de este método estriba en el criterio a aplicar para hacer variar los valores de las n secciones citadas. Evidentemente, dicha variación no puede producirse al azar, sino siguiendo un camino lógico. Concretamente, nuestro método se ha basado en el uso de funciones multiparamétricas y la utilización de la función chicuadrado:

$$\chi^2(A_1 \dots A_n) = \sum_{i=1}^n \frac{F_i^{\text{exp}} - F_i^{\text{teo}}(A_1 \dots A_n)}{F_i^{\text{teo}}(A_1 \dots A_n)}$$

donde F_i^{exp} representa el valor de la frecuencia del formante i del espectro vocálico experimental del que queremos averiguar la configuración del tracto y $F_i^{\text{teo}}(A_1 \dots A_n)$ es el valor de la frecuencia del formante calculado por el método directo para una configuración determinada del tracto en cuestión.

El proceso de minimización de χ^2 proporciona el valor de los n parámetros $A_1 \dots A_n$ buscados. Este cálculo es muy laborioso y se ha llevado a

LOCUTOR A

| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 600 | 596 | 100 | 120 | 83 | 83 |
| 1.750 | 1.751 | 225 | 190 | 69 | 72 |
| 2.700 | 2.681 | 200 | 205 | 66 | 69 |
| 3.850 | 3.820 | --- | 345 | 59 | 64 |

LOCUTOR B

| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 525 | 526 | 200 | 130 | 80 | 80 |
| 1.625 | 1.641 | 150 | 180 | 70 | 69 |
| 2.475 | 2.476 | 255 | 205 | 62 | 64 |
| 3.700 | 3.680 | 225 | 325 | 54 | 57 |

LOCUTOR C

| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 525 | 526 | 100 | 110 | 81 | 81 |
| 1.575 | 1.571 | 225 | 165 | 70 | 69 |
| 2.375 | 2.386 | 325 | 180 | 56 | 64 |
| 3.550 | 3.545 | 275 | 285 | 55 | 53 |

LOCUTOR D

| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 650 | 651 | 150 | 130 | 86 | 86 |
| 2.000 | 2.006 | 275 | 215 | 76 | 78 |
| 2.675 | 2.691 | 250 | --- | 80 | 74 |
| 3.700 | 3.655 | 300 | 495 | 68 | 69 |

Tabla 1.- Valores experimentales y teóricos de la frecuencia, anchura y nivel de los cuatro primeros formantes de la vocal e abierta tónica.

cabo utilizando los ordenadores VAX 11/780 y MicroVAX del Instituto de Física Corpuscular de Valencia, conectados a la red de ordenadores del C.E.R.N., lo cual nos ha permitido utilizar la librería de programas de este organismo y, en particular, el programa de minimización Minuit⁽³⁾.

| VOCAL A TÓNICA | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------------|---|
| Areas (cm ²) | | | | Long. (cm) | |
| A | B | C | D | | |
| 3.8 | 3.9 | 3.9 | 10.8 | 1.0 | L |
| 11.5 | 11.4 | 9.6 | 17.0 | 1.0 | ↑ |
| 9.0 | 8.4 | 11.0 | 16.9 | 1.0 | |
| 13.9 | 10.5 | 10.5 | 15.5 | 1.0 | |
| 14.0 | 15.0 | 10.9 | 10.9 | 1.0 | |
| 11.8 | 10.3 | 7.6 | 16.9 | 1.0 | |
| 4.7 | 8.5 | 7.0 | 6.5 | 1.0 | |
| 5.9 | 2.9 | 7.3 | 6.7 | 1.0 | |
| 5.1 | 8.1 | 1.9 | 5.3 | 1.0 | |
| 3.0 | 4.9 | 4.9 | 3.4 | 1.0 | |
| 2.6 | 1.0 | 4.0 | 2.5 | 1.0 | |
| 2.5 | 1.6 | 0.8 | 2.6 | 1.0 | |
| 3.9 | 4.8 | 4.8 | 1.5 | 1.0 | |
| 2.9 | 3.9 | 3.4 | 2.8 | 2.0 | |
| 0.6 | 0.9 | 1.9 | 0.8 | 2.0 | G |

| VOCAL I ÁTONA | | | | | |
|---------------|------|------|------|-----|---|
| | | | | | |
| 2.4 | 2.6 | 1.6 | 2.5 | 1.0 | L |
| 1.4 | 5.5 | 4.1 | 5.5 | 1.0 | ↑ |
| 1.2 | 1.5 | 4.5 | 2.4 | 1.0 | |
| 3.0 | 2.6 | 2.1 | 2.2 | 1.0 | |
| 1.5 | 6.9 | 6.6 | 2.5 | 1.0 | |
| 2.1 | 5.3 | 3.9 | 3.7 | 1.0 | |
| 8.0 | 3.7 | 6.3 | 6.3 | 1.0 | |
| 14.0 | 9.8 | 11.8 | 10.3 | 1.0 | |
| 12.6 | 15.0 | 14.0 | 15.5 | 1.0 | |
| 10.2 | 15.0 | 12.7 | 15.5 | 1.0 | |
| 14.0 | 11.3 | 9.4 | 14.1 | 1.0 | |
| 6.8 | 8.0 | 7.1 | 9.5 | 1.0 | |
| 8.0 | 4.9 | 8.0 | 6.1 | 1.0 | |
| 3.4 | 4.6 | 5.1 | 3.9 | 2.0 | |
| 1.5 | 1.5 | 2.6 | 0.6 | 2.0 | G |

Tabla 2. Valores teóricos de los parámetros del tracto vocal para dos fonemas diferentes.

Resultados

En una primera etapa de nuestro trabajo, se han calculado los trectos correspondientes a las vocales catalanas a tónica, e abierta tónica, i átona y o abierta tónica de cuatro personas diferentes (varones adultos con un nivel cultural elevado) (4). Para caracterizar los formantes de estas vocales se han escogido cinco palabras diferentes, con diferentes contextos consonánticos, con el fin de asegurar un fonema lo más general posible.

| Areas (cm ²) | | | | Longit. (cm) | |
|--------------------------|------|---------|------|--------------|---|
| "Bassa" | | "Grapa" | | | |
| E | F | E | F | | |
| 6.4 | 5.1 | 5.3 | 3.0 | 1.0 | L |
| 13.5 | 16.9 | 14.1 | 14.7 | 1.0 | ↑ |
| 12.2 | 17.8 | 13.0 | 16.0 | 1.0 | |
| 14.0 | 14.0 | 12.7 | 15.0 | 1.0 | |
| 13.5 | 17.8 | 13.6 | 15.0 | 1.0 | |
| 9.6 | 12.7 | 6.9 | 8.8 | 1.0 | |
| 7.8 | 10.2 | 5.0 | 5.6 | 1.0 | |
| 9.6 | 2.5 | 8.1 | 2.2 | 1.0 | |
| 5.9 | 4.4 | 7.8 | 8.4 | 1.0 | |
| 4.2 | 5.3 | 6.6 | 6.1 | 1.0 | |
| 2.5 | 1.3 | 7.9 | 5.7 | 1.0 | |
| 1.8 | 1.4 | 4.6 | 1.0 | 1.0 | |
| 6.2 | 2.9 | 4.3 | 4.4 | 1.0 | |
| 4.1 | 4.8 | 3.8 | 1.1 | 2.0 | |
| 1.2 | 1.7 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | G |

Tabla 3. Configuraciones de los trectos correspondientes a un mismo fonema (vocal a tónica) en dos contextos consonánticos diferentes para dos locutores diferentes.

Las configuraciones obtenidas en nuestros cálculos son completamente lógicas (en el sentido de sus posibilidades reales de articulación) y concordantes con las calculadas por otros autores (5). Al aplicarles el modelo de producción de sonidos vocálicos (proceso directo), la función de transferencia de estos trectos presenta resonancias muy parecidas (en algunos casos totalmente coincidentes) a las encontradas experimentalmente.

A título de ejemplo, en la tabla 1 comparamos los valores experimentales y teóricos de la frecuencia, anchura y nivel de los cuatro primeros formantes (F1, F2, F3 y F4) de la vocal e abierta tónica para los cuatro locutores considerados en nuestro trabajo. En la figura 1 reproducimos los espectros de frecuencia experimentales de la vocal a tónica pronunciada por dos locutores diferentes junto con los espectros teóricos correspondientes. En la tabla 2 se recogen los valores de los parámetros A_i calculados teóricamente para el caso de las vocales a tónica e i átona (dimensiones de 15 tubos cilíndricos consecutivos, desde los labios L a la glotis G, en que se supone dividido el tracto vocal). En la figura 2 reproducimos los esquemas de los trectos vocales de diferentes locutores para las vocales a tónica e i átona.

| Valor A(4) | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | Valor A(14) |
|------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------|
| 1.0.- | 5 5 5 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 4 4 4 | 5 5 5 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 4 4 4 | 4 5 5 | 5 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 4 4 4 | 4 4 4 | 5 5 5 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 4 4 3 | 4 4 4 | 4 4 5 | 5 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 4 4 3 | 3 4 4 | 4 4 4 | 5 5 5 | 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 |
| 2.0.- | 4 4 3 | 3 3 4 | 4 4 4 | 4 4 4 | 4 5 5 5 5 5 5 5 6 |
| | 4 4 4 | 3 3 3 | 4 3 4 | 4 4 4 | 4 4 4 4 4 5 5 5 |
| | 4 4 4 | 3 3 3 | 4 3 4 | 4 4 4 | 4 4 4 4 4 4 4 5 |
| | 5 5 4 | 4 4 3 | 2 2 1 | 2 2 3 | 3 4 4 4 4 4 4 |
| | 6 5 5 | 4 4 3 | 2 2 1 | 0 1 2 | 3 3 4 4 4 4 4 |
| | 6 5 5 | 5 4 4 | 4 3 3 | 3 3 3 | 4 3 4 4 4 4 4 |
| 3.0.- | 6 6 5 | 5 5 4 | 4 4 3 | 3 3 3 | 4 3 4 4 4 4 4 |
| | 6 6 6 | 5 5 5 | 4 4 4 | 4 4 4 | 4 4 4 4 4 4 4 |
| | 6 6 6 | 6 5 5 | 5 5 4 | 4 4 4 | 4 4 4 4 4 4 4 |
| | 5 6 6 | 6 6 5 | 5 5 4 | 4 4 4 | 4 4 4 4 5 5 |
| | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 5 5 | 5 5 5 | 5 5 5 5 5 5 5 |
| | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 5 | 5 5 5 | 5 5 5 5 5 5 5 |
| 4.0.- | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 5 5 | 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 |
| | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 | 6 6 6 6 6 6 6 |

| Valor | Intervalo de valores de chucuadrado |
|-------|-------------------------------------|
| 0 | 0.0000 - 0.0000 |
| 1 | 0.0000 - 0.0001 |
| 2 | 0.0001 - 0.0005 |
| 3 | 0.0005 - 0.0010 |
| 4 | 0.0010 - 0.0050 |
| 5 | 0.0050 - 0.0100 |
| 6 | 0.0100 - 0.0500 |

Tabla 4. Zonas de igual error encontradas para la vocal *i* átona del locutor A al cruzar los valores encontrados por el programa de minimización para los tramos 4^o y 14^o.

Los resultados obtenidos en esta primera fase del trabajo se han sometido a una prueba de validación basada en el cálculo de los diferentes trectos que se articulan para pronunciar una misma vocal en contextos diferentes. Los resultados de esta prueba de validación han sido muy positivos: todos los trectos teóricos son perfectamente lógicos y las correspondientes funciones de transferencia son siempre muy cercanas a las experimentales. En la tabla 3 damos un ejemplo de dichos

| LOCUTOR A | | | | | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 300 | 301 | 150 | 115 | 78 | 78 |
| 2.000 | 2.001 | 175 | 225 | 66 | 55 |
| 2.750 | 2.751 | --- | 335 | 58 | 53 |
| 3.400 | 3.620 | 250 | 260 | 61 | 50 |

| LOCUTOR B | | | | | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 375 | 401 | 125 | 110 | 82 | 82 |
| 1.875 | 1.856 | 175 | 215 | 60 | 64 |
| 2.500 | 2.551 | 225 | 220 | 47 | 62 |
| 3.900 | 3.995 | 225 | 310 | 55 | 60 |

| LOCUTOR C | | | | | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 375 | 396 | 150 | 105 | 78 | 78 |
| 1.750 | 1.751 | 100 | 180 | 64 | 60 |
| 2.450 | 2.586 | 100 | 210 | 60 | 59 |
| 3.550 | 3.600 | 225 | 230 | 54 | 54 |

| LOCUTOR D | | | | | |
|-----------------|-------|--------------|------|------------|------|
| Frecuencia (Hz) | | Anchura (Hz) | | Nivel (dB) | |
| exp. | teo. | exp. | teo. | exp. | teo. |
| 375 | 391 | 100 | 100 | 82 | 82 |
| 2.275 | 2.191 | 314 | 255 | 73 | 64 |
| 2.750 | 2.915 | 294 | 275 | 75 | 65 |
| 3.750 | 3.830 | 334 | 280 | 62 | 64 |

Tabla 5. Valores experimentales y teóricos de la frecuencia, anchura y nivel de los cuatro primeros formantes de la vocal *i* átona (tractos suavizados).

resultados para la vocal *a* tónica en dos contextos consonánticos diferentes para dos locutores diferentes; este ejemplo se refiere concretamente a la primera vocal *a* de las palabras catalanas "bassa" y "grapa". Para facilitar la comparación hemos procedido a normalizar los niveles del primer formante del espectro y de la función de transferencia a

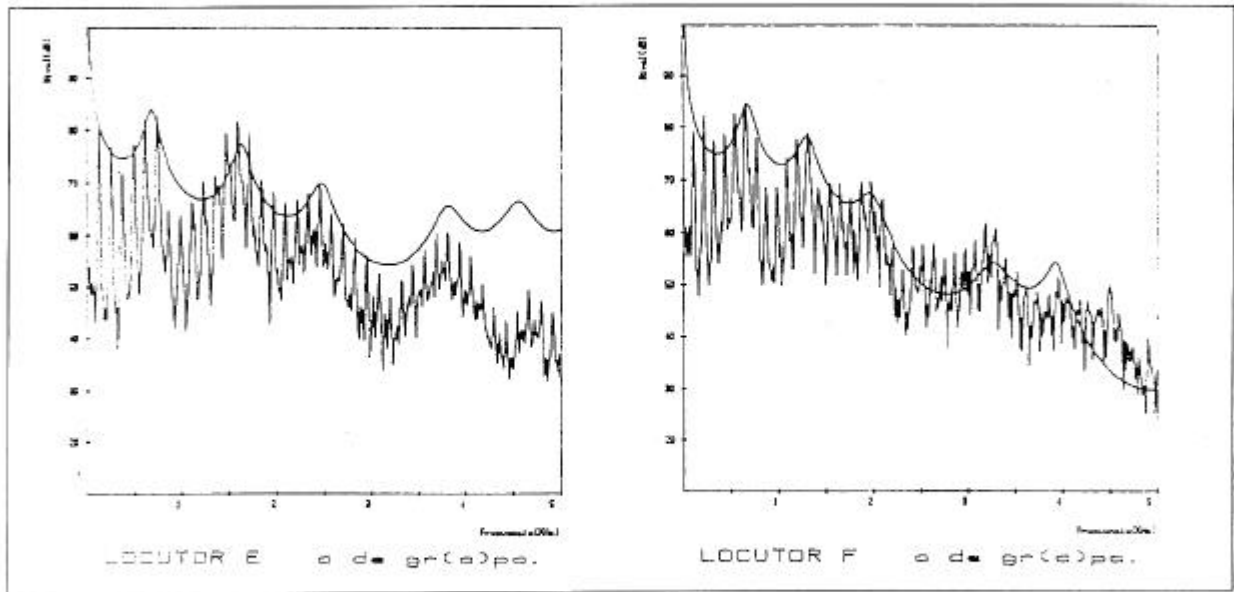


Figura 1. Espectros de frecuencias experimentales y teóricos de la vocal a tónica.

un mismo valor. Téngase en cuenta que, aunque la función de transferencia del tracto presente las resonancias en el mismo lugar que el espectro experimental de la voz, el nivel de estas resonancias no tiene por qué coincidir exactamente con el de los formantes experimentales (recuérdese que el espectro experimental es el producto de la función de transferencia del tracto y el tono glotal).

La fase siguiente de nuestra investigación consistió en estudiar si un determinado tracto resultante era el único posible o hasta qué punto el resultado obtenido presentaba alguna indeterminación; en otras palabras, se trataba de comprobar si existían otros tractos alternativos de dimensiones diferentes, pero cuya función de transferencia fuera capaz de reproducir igualmente bien el espectro experimental. Este estudio se ha llevado a cabo cruzando los valores de dos tramos diferentes del tracto básico, bien contiguos, bien separados el uno del otro. Nuestros resultados excluyen cualquier posibilidad de indeterminación en el cálculo de los tractos teóricos; en particular, se ha encontrado que las curvas de igual error (es decir, con valores iguales de la función chi cuadrado) son más o menos concéntricas en torno a los valores calculados originalmente por el programa Minuit como correctos. A título de ejemplo, en la tabla 4 se reproduce el mapa de errores encontrados para la vocal i átona del locutor A al cruzar los valores dados por el programa de minimización para los tramos 4° y 14° (los valores óptimos en este caso son $A_4=3.0 \text{ cm}^2$ y $A_{14}=3.4 \text{ cm}^2$).

En la última fase de nuestro trabajo hemos procedido a suavizar las configuraciones del tracto calculado teóricamente con el fin de averiguar si esta suavización mejora los resultados obtenidos. Desde el punto de vista del modelo utilizado, dicha suavización consiste en la inferencia de un número mayor de tubos cilíndricos con el fin de reducir al máximo las discontinuidades existentes en las uniones de los tubos sucesivos y que, evidentemente, no responden a la configuración de un tracto real. Como es natural, cuanto mayor sea el grado de suavización (es decir, cuanto mayor sea el número de tubos considerados en los cálculos), tanto mayor será el tiempo de cálculo necesario para llegar al resultado final. En la figura 3 representamos los resultados obtenidos con una configuración de 38 tubos en lugar de 15. Los tractos reproducidos corresponden a las vocales a tónica e i átona para cuatro locutores diferentes; en dicha figura se representan también los respectivos tractos promedios. Finalmente, en la tabla 5 damos un ejemplo de los resultados obtenidos en la caracterización de formantes después de suavizar los tractos encontrados para la vocal i átona. El acuerdo entre los respectivos valores experimentales y teóricos es extraordinariamente bueno.

Conclusiones

El objetivo específico de este trabajo ha consistido en desarrollar un programa de minimización de funciones multiparámetros y aplicarlo a

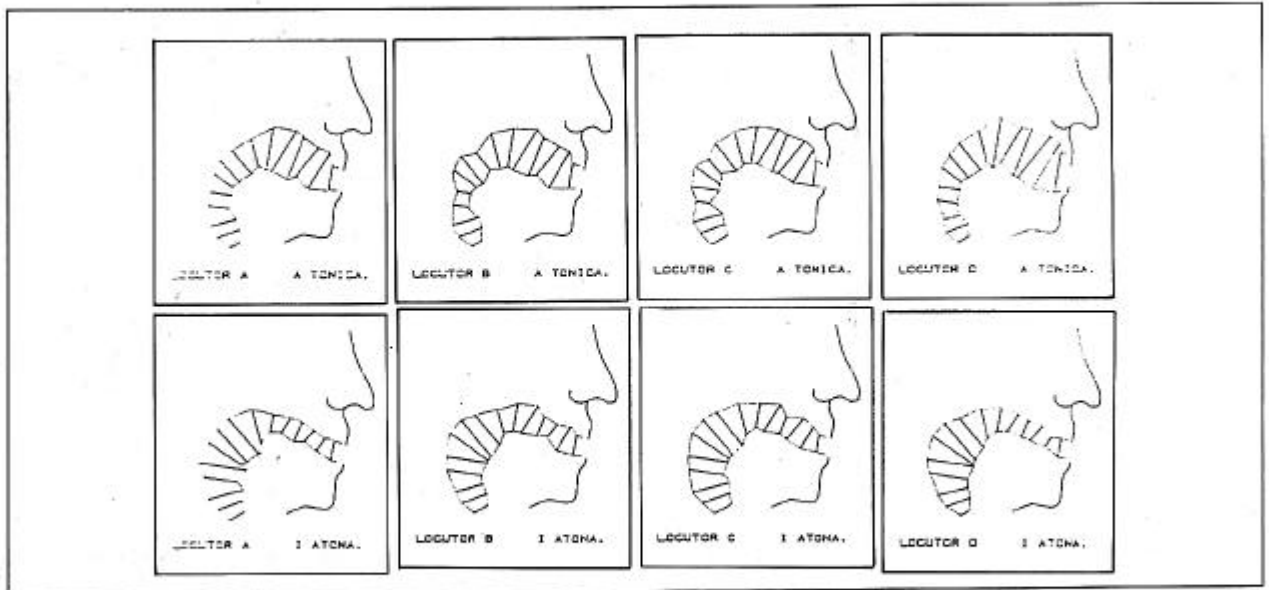


Figura 2. Esquema de los trectos vocales de diferentes locutores para las vocales a tónica i átona.

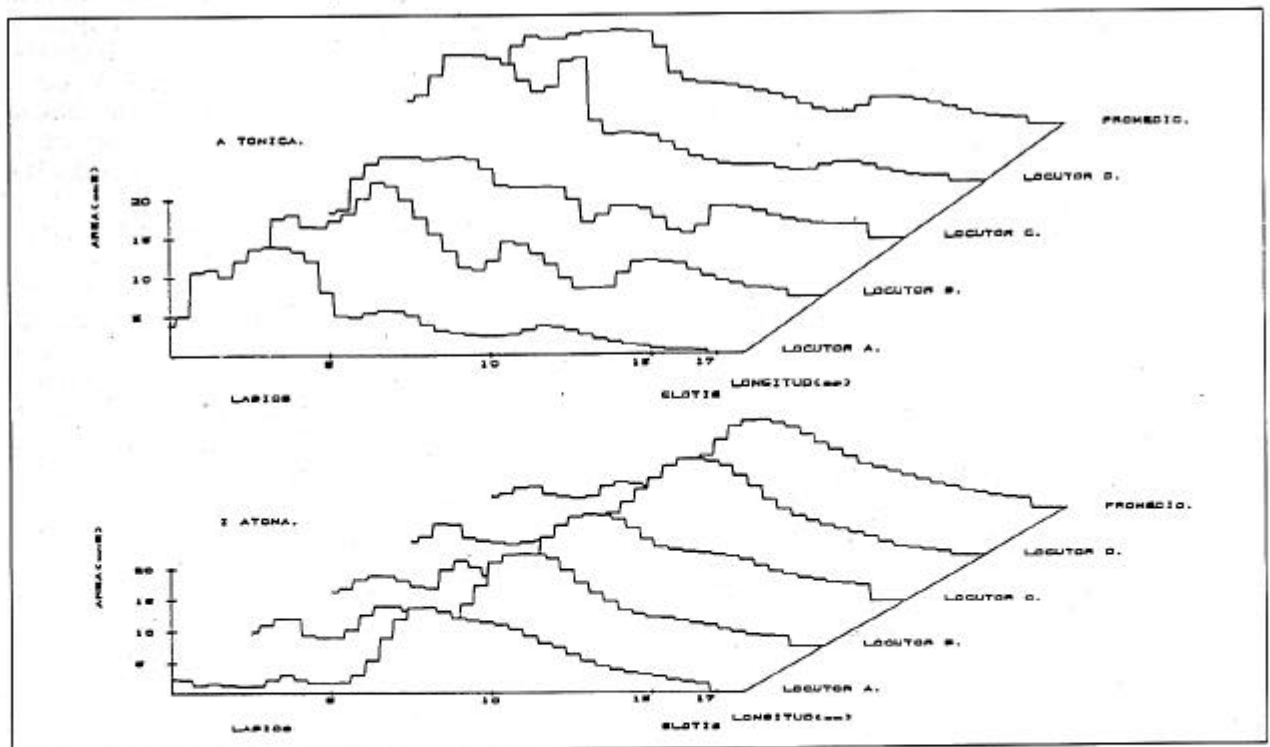


Figura 3. Configuración de los trectos correspondientes a las vocales a tónica e i átona.

la determinación del tracto vocal que ha articulado un cierto sonido vocálico a partir del análisis de frecuencias de dicho sonido.

Se ha comprobado que las configuraciones del tracto que proporciona el programa en cuestión son perfectamente lógicas. En este sentido, hemos de tener presente que los valores de las frecuencias de las resonancias de la función de transferencia y de los formantes del espectro deben coincidir para que el tracto sea óptimo, pero no se puede decir lo mismo en relación con el nivel de dichos formantes y resonancias, ya que el espectro teórico es el resultado del producto de la función de

transferencia y el tono glotal. En consecuencia, la validación de un determinado tracto teórico se ha basado estrictamente en el grado de coincidencia entre sus resonancias y los formantes experimentales del fonema vocálico estudiado.

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo demuestran claramente que el programa de minimización utilizado es capaz de resolver el problema planteado de forma plenamente satisfactoria. En la actualidad estamos estudiando las posibilidades que ofrece la aplicación de este método a los procesos de reeducación de la voz humana.

Referencias

(1) J. L. Flanagan.- "Speech analysis, synthesis and perception".- Springer-Verlag. Berlín (1983).

(2) J.D. Markel y A.H. Gray.- "Linear prediction of speech". Springer-Verlag. Berlín (1980).

(3) F. James y M. Roos.- "Function minimization and error analysis (Minuit)".- CERN Com

puter Centre. Ref. D506 (1983).

(4) J. Martí.- "Paràmetres vocàlics del català".- Folia Phonetica 1 23 (1984).

(5) J.P. Fefevre, F. Lonchamp y J.P. Zerling.- "Détermination des fonctions d'aire vocaliques d'un sujet par deux méthodes".- 11 Congrès International d'Acoustique (1983).