

**EL SISTEMA DE MAGNETOMETRÍA EMA APLICADO
AL ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DEL HABLA**

MACARENA CAGIGAL

Laboratori de Fonètica, Institut d'Estudis Catalàns

DANIEL RECASENS

Laboratori de Fonètica, Institut d'Estudis Catalans

Dept. Filologia Catalana U.A.B.

RESUMEN

Este trabajo describe el funcionamiento del sistema de articulometría midsagital electromagnética (EMA) Articulograph AG100 de Carstens Medizinelektronik. También proporciona detalles sobre la calibración del sistema así como sobre algunos aspectos que deben ser tenidos en cuenta durante una sesión experimental (por ejemplo, colocación de los sensores y del casco, obtención de la superficie del paladar) y para un análisis satisfactorio de los datos (corrección del movimiento de la cabeza, normalización de medidas). Se ilustra el proceso de obtención de datos de desplazamiento articulatorio y de velocidad, y se muestra cómo dichos datos pueden ser utilizados para el estudio de la coarticulación e implementados con datos electropalatográficos y acústicos.

ABSTRACT

This paper describes the operation of the electromagnetic midsagittal articulometry (EMA) system Articulograph AG100 from Carstens Medizinelektronik. It also gives details about the system calibration procedure and about several aspects which need to be taken care of during a recording session (e.g., coils and helmet placement, palate surface tracking) and for EMA data analysis (head movement correction, data normalization). The paper illustrates the extraction method of articulatory displacement and velocity, and shows how articulatory movement data can be applied to the study of coarticulation and may be implemented with electropalatographic and acoustic data.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es efectuar una descripción del sistema de magnetometría EMA ('electromagnetic midsagittal articulometry', en inglés; articulometría midsagital electro-magnética, en español) utilizado para el estudio de la articulación de los sonidos lingüísticos en el proceso de producción del habla. Este sistema se basa en la detección de campos magnéticos para la obtención de datos de movimiento en múltiples puntos de los órganos articulatorios. A diferencia de otras técnicas de investigación fonética como la radiología, la magnetometría no resulta perjudicial para la salud del sujeto hablante.

Ha sido necesario un largo proceso de calibración y adaptación del software y hardware para perfeccionar la calidad y fiabilidad de la técnica EMA. Actualmente existen dos equipos de estas características: el sistema americano de MIT (Perkell et al., 1992) y el sistema alemán Articulograph AG100 de Carstens Medizinelektronik (Schönle et al., 1987; Schönle, 1988). En el Laboratori de Fonètica de l'Institut d'Estudis Catalans disponemos del modelo alemán, que describimos detalladamente en este artículo con el nombre de Articulógrafo.

2. FUNCIONAMIENTO GENERAL

El Articulógrafo consta de un casco (Figura 1) con soportes interiores para ajustarlo a la cabeza del sujeto hablante y con un soporte exterior que pende del techo mediante una polea. Alrededor del casco hay tres bobinas transmisoras dispuestas en forma de un triángulo equilátero de 33 cm de lado, que configuran el plano medial: la bobina F se halla situada delante del hueso frontal, la bobina B frente al maxilar inferior o barbilla, y la bobina C detrás del cuello en la zona occipital. Cada una de estas bobinas genera un campo magnético alterno de distintas frecuencias, que induce un voltaje alterno en pequeñas bobinas colectoras o sensores de 2 mm de diámetro situadas en los órganos articulatorios del hablante. El Articulógrafo del

Laboratori de Fonètica de l'Institut d'Estudis Catalans es capaç de registrar la senyal de moviment de hasta diez sensores.

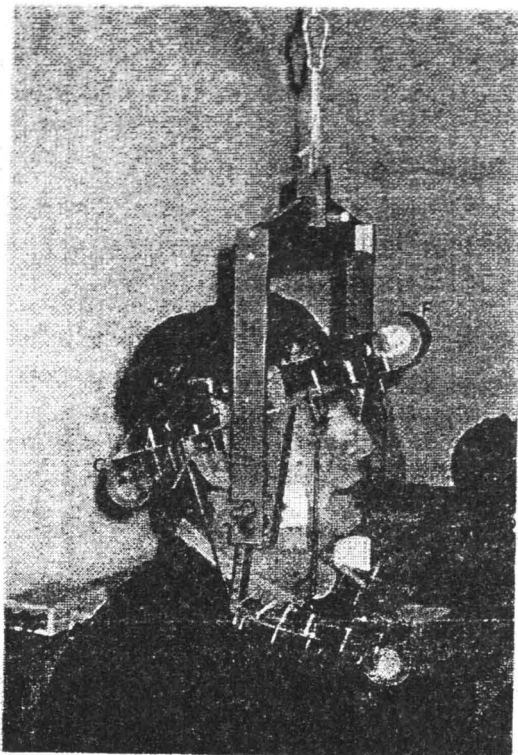


Fig. 1. Casco del Articulógrafo con bobinas transmisoras y soporte exterior.

Tal como muestra la Figura 2, los sensores suelen emplazarse sobre el ápice lingual (AL), la lámina lingual (LL) y el dorso lingual (DL) para la detección del movimiento lingual, sobre el labio superior (LS) y el labio inferior (LI) para la detección del movimiento labial, y delante de los incisivos inferiores para la detección del movimiento de la mandíbula inferior (MI). Dos sensores de referencia se colocan en

puntos inmóviles, a saber, sobre el puente entre la nariz y la frente (NF), y delante de los incisivos superiores (IS).

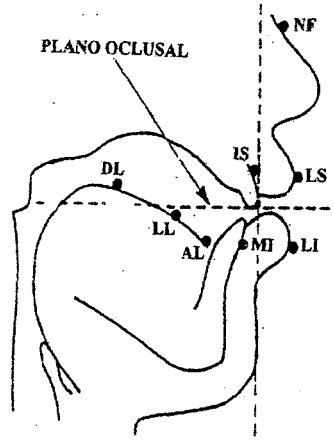


Fig. 2. Posible emplazamiento de los sensores en los órganos articulatorios (véase texto para el significado de su denominación) y ejes del plano oclusal delimitado mediante líneas discontinuas.

La amplitud del voltaje alterno inducido permite calcular la distancia entre las bobinas transmisoras y los sensores. Dado que las bobinas transmisoras operan a diferentes frecuencias, es posible determinar simultáneamente la distancia entre los distintos sensores y cada una de las bobinas transmisoras; también resulta factible la obtención de las coordenadas XY dentro del plano medial, con el eje Y delimitado por las dos bobinas delanteras F y B y el origen situado en la bobina B (Figura 1). Este mecanismo operativo permite obtener los datos de movimiento de la lengua, los labios y la mandíbula.

La colocación de los sensores en los articuladores se realiza con ayuda de un cemento adhesivo (cemento ESPE Ketac Bond). Todos los sensores deben estar dispuestos en el plano medial, con sus ejes

paralelos a los ejes de las bobinas transmisoras, de forma que exista una relación directa entre la distancia entre sensores y bobinas transmisoras, y el voltaje inducido. En el caso de que un sensor esté rotado ligeramente en relación con el eje de las bobinas transmisoras se producirá una distorsión en las distancias calculadas puesto que el voltaje disminuye con el coseno del ángulo de rotación γ (ángulo de desalineamiento o 'tilt').

3. CALIBRACIÓN

El cálculo de la posición de los sensores se realiza teniendo en cuenta que, para distancias suficientemente grandes, la intensidad del campo magnético decrece en proporción inversa al cubo de la distancia entre sensores y bobinas transmisoras ($B \propto B_0/R^3$). La transformación de las señales medidas en distancias se lleva a cabo mediante tablas que relacionan posiciones del espacio (con una precisión de 0.01 mm) con la intensidad del campo. Dichas tablas se obtienen llevando a cabo una calibración que permite determinar experimentalmente los exponentes de la función $B(R)$. El proceso de calibración se efectúa registrando la señal de cada sensor en distintas posiciones fijas centradas dentro del espacio medial (hasta 72 posiciones para cada sensor), hasta cubrir una área de unos 113 cm² que abarca el posible rango de movimiento de los articuladores durante una sesión experimental. Los exponentes obtenidos en una calibración deben acercarse al valor teórico 3.

4. SISTEMA EXPERIMENTAL

4.1 Registro de la posición espacial

En la Figura 3 se muestra un esquema de los distintos bloques del sistema experimental.

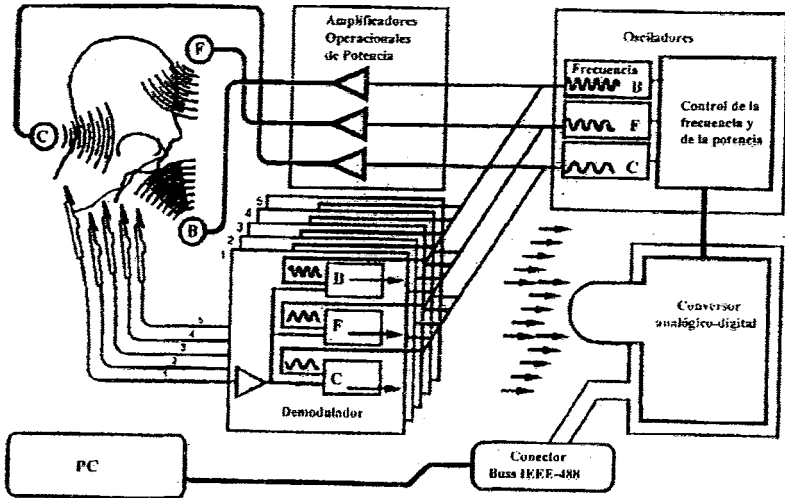


Fig. 3. Esquema de los bloques del Articulógrafo Carstens con cinco sensores (tomado de Carstens, 1993). La denominación de las bobinas transmisoras (B, F, C) es explicada en el texto.

Previamente a su tratamiento, la señal alterna inducida en los sensores se acondiciona mediante unos preamplificadores. La amplitud de la señal, que está relacionada directamente con la distancia entre los sensores y las bobinas transmisoras, se recupera mediante una demodulación inducida en los sensores en sincronía con las tres frecuencias de operación. Con ello es posible recuperar la distancia entre cada sensor y cada una de las tres bobinas transmisoras.

Las señales de proximidad así obtenidas se digitalizan para permitir su posterior conversión en coordenadas XY dentro del plano medial. En nuestro laboratorio, este procesamiento se efectúa mediante un PC con CPU 486 a 66MHz. La conexión entre el PC y la circuitería de acondicionamiento se lleva a cabo mediante tarjetas estándar bus IEEE-488.

La toma de datos se efectúa con el programa AG100 que permite seleccionar la intensidad del campo magnético de las bobinas transmisoras, la frecuencia de muestreo de la posición espacial (entre 40 y 1250 muestras/sg), el número de sensores empleados en la medida (hasta un máximo de diez) y la señal acústica. Este programa también permite mostrar en pantalla la posición en tiempo real de cada uno de los sensores respecto de las bobinas transmisoras y, por tanto, llevar a cabo la comprobación del correcto funcionamiento del sistema durante el proceso de adquisición de datos.

Por último cabe destacar la necesidad de un correcto enrutado de los cables de conexión de los sensores, situándolos lo más lejos posible de las bobinas transmisoras para evitar posibles interferencias electromagnéticas que perturbarían las señales que son objeto del estudio.

4.2 Procesado digital del habla

El Articulógrafo dispone de equipamiento específico para la grabación de voz mediante micrófono, simultáneamente con la adquisición de datos de movimiento. La señal acústica analógica es digitalizada mediante la tarjeta Artus 962, que dispone de dos canales de 12 bits y una frecuencia de muestreo entre 7.1 y 18.3 KHz. Cada canal está integrado por un procesador del habla dedicado (OKI-MSM6388) y 4 Mbits de memoria, con lo cual es posible adquirir 65 segundos de habla muestreada a 16 KHz por canal. Los procesadores efectúan también una compresión de 12 bits PCM a 4 bits ADPCM lo que permite reducir en 2/3 la memoria de datos.

4.3 Sesión experimental

Antes de realizar una sesión experimental conviene asegurarse de que el casco esté bien colocado y, muy especialmente, de que todos los sensores se sitúen en el plano medial y estén orientados correctamente. La lectura de los sensores puede estar afectada por la estabilización de la temperatura de las bobinas transmisoras siendo su régimen

estacionario entre 55°C y 75°C. El experimentador puede visualizar en pantalla el movimiento de los sensores y su grado de desalineamiento, de forma que cualquier anomalía pueda corregirse antes de llevar a cabo el experimento.

En la sesión experimental descrita en este trabajo se realizaron medidas con seis sensores colocados en los articuladores principales, a saber, tres en la lengua (AL, LL, DL), dos en los labios superior e inferior (LS, LI) y uno en la mandíbula (MI), y con dos sensores adicionales de referencia (NF, IS). Los datos de movimiento se tomaron cada 4 ms a una frecuencia de 250 Hz, y la señal acústica se muestreó a 16 KHz. Se midió la distancia entre los sensores linguales para saber a qué lugar de su superficie habían sido adheridos (las distancias LL-AL y DL-LL fueron de alrededor de 1.5 cm en nuestro experimento).

La sesión experimental se completó obteniendo las coordenadas del plano oclusal del hablante al cual son referidos los datos de movimiento después de su procesamiento. La Figura 2 muestra que este plano está definido por el eje X, que sigue la horizontal de la lengua con origen de coordenadas entre los incisivos superiores e inferiores, y el eje Y perpendicular al eje X. El eje X del plano oclusal está delimitado por dos sensores colocados sobre una regla que el hablante sujeta horizontalmente entre los dientes. El experimentador obtuvo asimismo datos correspondientes al perfil de la bóveda del paladar mediante deslizamiento de un sensor desde los incisivos superiores hasta el límite posterior del paladar duro lo más cerca posible del plano medial. La orientación de estos datos de la bóveda palatal en relación con el movimiento de los sensores se corresponde con la realidad de forma aproximada.

5. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

Los datos grabados con el Articulógrafo contienen información general sobre las señales de movimiento, el grado de desalineamiento o factor de 'tilt' y la señal acústica. La primera columna del fichero de

datos de movimiento corresponde a las unidades temporales; las columnas siguientes corresponden a las coordenadas X e Y en el plano medial y al grado de desalineamiento de cada sensor. En el caso ideal en el que los ejes de los sensores están dispuestos en paralelo a los de las bobinas transmisoras, el coseno del ángulo es la unidad y el factor de 'tilt' o grado de desalineamiento se expresa mediante un valor 100. El programa MultiCV permite transformar los datos del Articulógrafo a diferentes formatos para hacerlos compatibles con otros programas.

El proceso de tratamiento de datos obliga a corregir los movimientos de la cabeza durante la sesión experimental. La estimación de esos movimientos viene determinada por cualquier movimiento de los sensores de referencia emplazados en la frente (NF) y en los incisivos superiores (IS), puesto que los dos están situados en puntos fijos. Por tanto, la corrección de datos para el resto de sensores implica un cambio al sistema de referencia formado por aquellos dos sensores y, posteriormente, al plano oclusal. Estas transformaciones se realizan mediante una rotación de ángulo α formado por el eje determinado por las bobinas transmisoras F y B y el eje determinado por los sensores NF e IS, y mediante una traslación al sensor IS como nuevo origen de coordenadas. Se repite un procedimiento similar para referir los datos al plano oclusal. Las nuevas coordenadas de un sensor cualquiera, como por ejemplo el AL (X'_{AL} , Y'_{AL}), vendrán dadas por las expresiones expuestas a continuación:

$$= a \operatorname{tg} \left(\frac{X_{NF} - X_{IS}}{y_{NF} - y_{IS}} \right)$$

$$\beta = \alpha - \varphi$$

$$\begin{pmatrix} X'_{AL} \\ Y'_{AL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{AL} - X_{IS} \\ Y_{AL} - Y_{IS} - d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & -\operatorname{sen} \beta \\ \operatorname{sen} \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$$

donde ' ϕ ' es el ángulo que forman el eje Y del plano oclusal y el definido por los sensores NF e IS, y 'd' es la distancia entre IS y el origen del plano oclusal.

Una vez convertida la señal de voltaje en distancia, se aplica un filtro paso bajo a las señales de movimiento en las dos direcciones X e Y usando una ventana cuadrada de cinco puntos. Para obtener la velocidad instantánea ($V_x(t)=dX(t)/dt$, $V_y=dY(t)/dt$), se calcula la primera derivada de la posición usando un algoritmo diferencial central de cinco puntos, y posteriormente los datos de velocidad obtenidos se suavizan con la misma ventana cuadrada. Por último, se calcula la velocidad tangencial a partir de las proyecciones de la velocidad en las dos direcciones X e Y: $V(t)=(V_x^2+V_y^2)^{1/2}(t)$. Tal como se especifica en el siguiente párrafo, los máximos, los mínimos y los ceros de estas funciones corresponden a puntos importantes en las trayectorias de movimiento.

En la Figura 4, se representan las trayectorias de movimiento en el plano XY de los tres sensores de la lengua durante la realización de la secuencia ana pronunciada dentro de una frase marco (por ejemplo, en la secuencia 'Digo banal ahora'). Dichas trayectorias son el resultado de promediar diez repeticiones de la misma secuencia. La figura también representa el perfil del paladar del hablante donde se han identificado las zonas alveolar y palatal. El origen del movimiento de los tres sensores está indicado mediante una flecha y procede en dirección antero-superior (sensores AL y LL) o anterior (sensor DL) hasta un punto de inflexión que en el caso del sensor AL corresponde al lugar de contacto ápicoalveolar. Los sensores LL y DL presentan poco movimiento puesto que las regiones laminal y dorsal de la lengua no intervienen directamente en la formación de la consonante n. Una vez llegado al punto de inflexión, el movimiento de los sensores toma la dirección infero-posterior (sensores AL y LL) o posterior (sensor DL) para la articulación de la segunda vocal a de la secuencia ana. El hecho de que el punto de elevación máxima del sensor AL no toque la curva de la bóveda palatal en su zona alveolar puede ser debido a dos

factores, a saber, a la colocación demasiado posterior de este sensor en relación con el ápice lingual o bien a problemas derivados del método de detección de la curva de la bóveda palatal (véase sección 3).

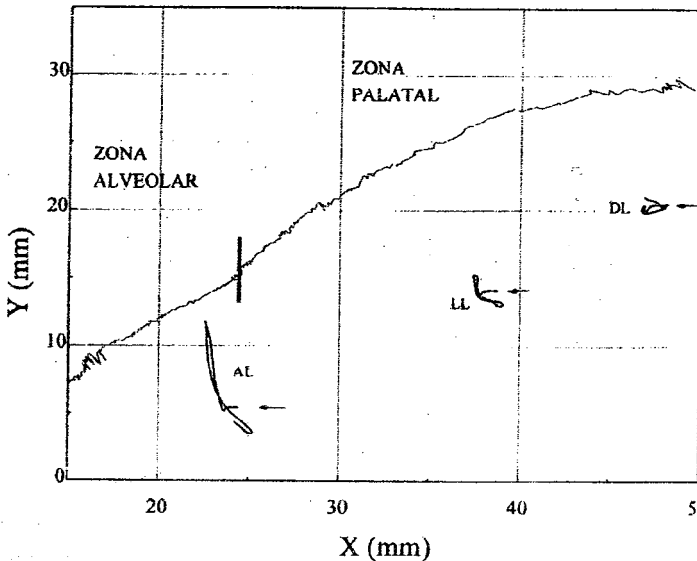


Fig. 4: Representación XY del movimiento de los sensores situados en el ápice lingual (AL), en la lámina lingual (LL) y en el dorso lingual (DL) durante la realización de la secuencia *ana*. Las flechas indican el origen del movimiento en el inicio de la primera vocal de la secuencia (véase texto para la orientación de las trayectorias de movimiento). El perfil superior representa la curva del paladar, con indicación expresa de las zonas alveolar y palatal.

La Figura 5 representa la evolución temporal de la posición del sensor lingual AL en las dos direcciones X (horizontal) e Y (vertical), de las velocidades respectivas (V_x , V_y), y de la velocidad tangencial (V_t), conjuntamente con la onda acústica. Por lo que respecta a las trayectorias de desplazamiento, el grado de avanzamiento lingual aumenta con un descenso de la trayectoria X mientras que un aumento

de la trayectoria Y comporta una mayor elevación lingual; con referencia a las trayectorias V_x y V_y cabe decir que la velocidad alcanza un máximo o un mínimo en los puntos donde las trayectorias experimentan mayor variación; la trayectoria de la velocidad tangencial (V_t), aún conjugando ambas direcciones, se comporta de forma similar. Los datos de esta figura corresponden a una sola repetición de la secuencia ana representada en la Figura 4. El origen de tiempos ($t=0$) se ha colocado en el inicio del período oclusivo de la consonante n que, a su vez, coincide con el inicio de máxima elevación de la trayectoria Y. La información proporcionada por la curva de la velocidad tangencial permite identificar los siguientes puntos sobre las trayectorias de movimiento horizontal (X) y vertical (Y): m_1 , m_2 y m_3 , en el primer, segundo y tercer mínimos de V_t , que determinan, respectivamente, el inicio de elevación apical, la posición apical máxima y el fin del descenso apical en la trayectoria Y; M_1 y M_2 , en el primer y segundo máximos de V_t , que determinan, respectivamente, la máxima velocidad de elevación y de descenso apicales en la trayectoria Y.

También han sido numerados diferentes eventos en la onda acústica: el comienzo de la primera vocal a (A); el inicio (B) y el final (C) del período oclusivo de la consonante n; el término de la segunda vocal a (D). El período oclusivo de la consonante (es decir, el período de contacto apicoalveolar completo durante el cual el aire no sale al exterior) no puede determinarse con exactitud a partir de los datos de movimiento puesto que la técnica EMA no permite obtener una representación transversal de la cavidad bucal. Puede ser inferido a partir de la onda acústica, donde procede desde el instante B en que el inicio de la oclusión promueve una disminución de energía acústica hasta el instante C en que la abertura gradual de la cavidad bucal promueve un incremento de amplitud. La figura muestra una buena correspondencia entre el inicio de la oclusión en la onda acústica (punto B) y el momento en que el sensor AL alcanza su máxima elevación en la trayectoria Y (instante $t=0$).

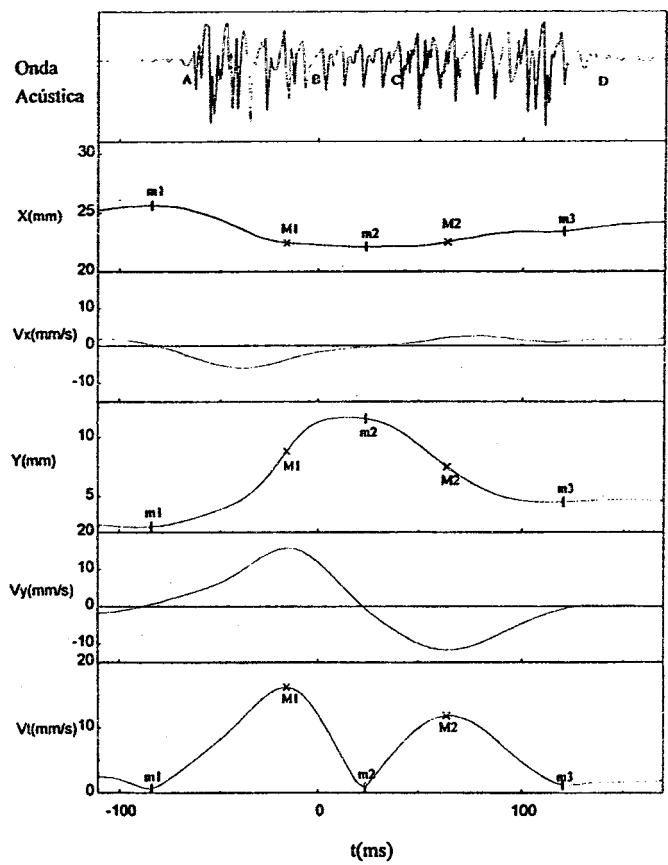


Fig. 5: Representación de las señales temporales más características del sensor AL durante la emisión de la secuencia ana. Empezando en la parte superior, pueden observarse la onda acústica, la trayectoria de movimiento horizontal X y su velocidad V_x , la trayectoria de movimiento vertical Y y su velocidad V_y , y la velocidad tangencial V_t . El significado de los eventos indicados en estas señales es explicado en el texto.

6. APLICACIONES

6.1 Complementación con otras señales

(a) La técnica EMA proporciona información sobre el movimiento de los órganos articulatorios en el plano medial. Tal como muestran otros trabajos (Kühnert, 1993; Hoole 1993), dicha información puede combinarse con datos de contacto linguopalatal obtenidos mediante la técnica electropalatográfica o EPG (Hardcastle et al., 1989). Esta técnica permite obtener configuraciones linguopalatales sobre un paladar artificial con un número considerable de pequeños electrodos de oro (63) que se encienden cuando la lengua hace contacto con el paladar (Figura 6). Los electrodos se hallan dispuestos en ocho filas, cuatro delanteras a lo largo de los alveolos o zona alveolar y cuatro posteriores a lo largo del paladar propiamente dicho o zona palatal. La distancia entre las filas alveolares es menor que la existente entre las filas de la zona palatal, aunque esta diferencia no aparece reflejada en las configuraciones linguopalatales de la figura. El intervalo temporal entre dos configuraciones linguopalatales es de 5 ms.

Los datos de la Figura 6 corresponden a una repetición de la secuencia ana, emitida con mayor rapidez por el mismo hablante utilizado para la adquisición de los datos EMA. En la figura, la primera marca vertical ha sido insertada antes de la primera configuración linguopalatal con activación de todos los electrodos en alguna de las filas de la zona alveolar y, por tanto, en el inicio del período oclusivo alveolar de n. La segunda marca ha sido insertada al final de dicho período, justo en el momento en que deja de producirse activación completa en alguna de las filas de la zona alveolar. Estos dos instantes temporales suelen corresponder al inicio y al fin de la plataforma de máxima elevación del sensor A (véase trayectoria Y en la Figura 5).

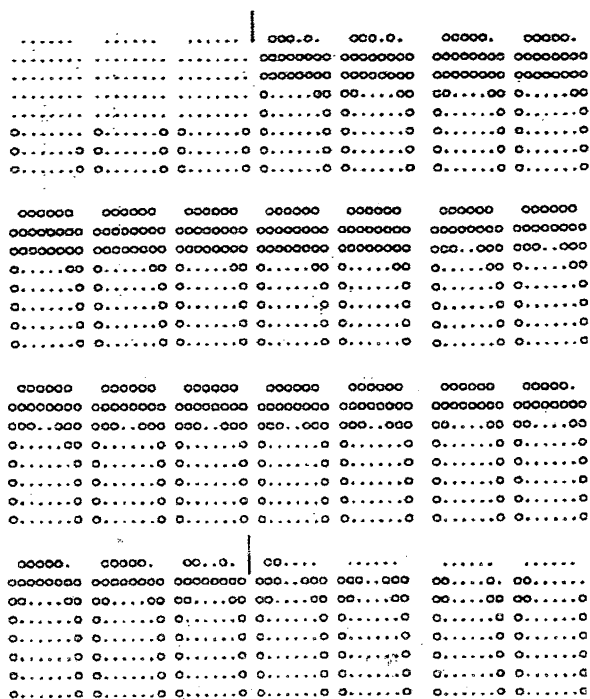


Fig. 6. Configuraciones de contacto linguopalatal correspondientes a la secuencia ana. El inicio y el fin del periodo oclusivo de la consonante han sido indicados mediante líneas verticales.

El efecto de los electrodos activados sobre la posición de los sensores es inferior al nivel de ruido del sistema EMA (0.1 mm; Rouco y Recasens, 1996), lo cual posibilita la utilización conjunta de las técnicas EMA y EPG. Por su parte, la presencia de sensores en la lengua puede impedir la activación de algunos electrodos emplazados cerca de la línea media del paladar y, por tanto, en el plano medial del campo magnético; en principio, este problema puede solucionarse ajustando la sensibilidad del sistema EPG o bien disminuyendo la cantidad de cemento colocada sobre los sensores.

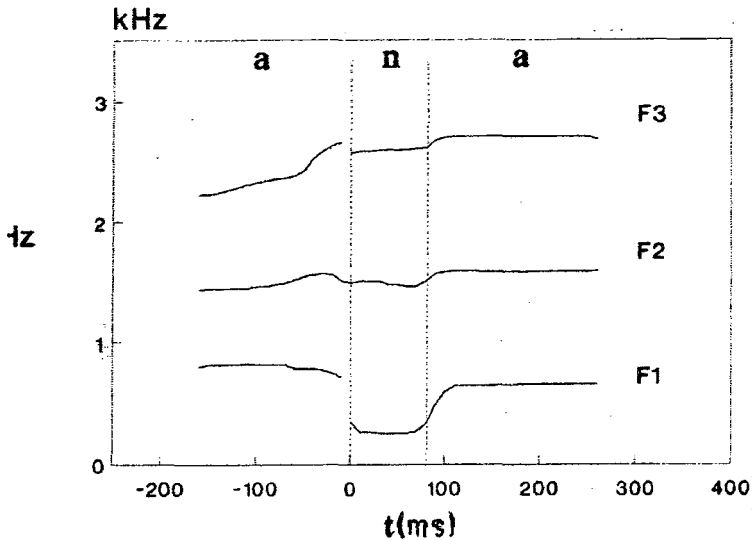


Fig. 7: Representación temporal de los tres primeros formantes del espectro (F1, F2, F3) correspondientes a la secuencia ana. Las líneas verticales de trazos corresponden al inicio y al fin de la oclusión consonántica.

(b) El análisis frecuencial de la onda acústica permite obtener la evolución temporal de los tres primeros formantes (F1, F2, F3) del espectro de los sonidos lingüísticos. En la Figura 7 se observa dicha evolución para los sonidos sonoros a, n y a correspondientes a una repetición de la secuencia ana no coincidente con la representada en las figuras anteriores; dos líneas verticales de trazos indican el inicio de la oclusión de n en el momento temporal 0 y el fin de dicha oclusión unos 80 ms más tarde. Dichas trayectorias han sido extraídas mediante el método de predicción lineal ('linear prediction coding', en inglés; Markel y Gray, 1976). Los formantes corresponden a diferentes propiedades articulatorias de los sonidos. Así, F1 de a depende del grado de abertura de la cavidad oral, lo cual explica que su frecuencia descienda a lo largo de la primera vocal hasta el período oclusivo de n en la secuencia ana: un movimiento descendente de F1 en este caso indica un cierre

progresivo de la cavidad durante la transición de la vocal a a la consonante oclusiva n. Por su parte, F2 de a depende de las dimensiones de la cavidad anterior, lo cual explica que su frecuencia ascienda durante la emisión de la primera vocal de la secuencia ana; este movimiento ascendente de F2 indica que las dimensiones de aquella cavidad disminuyen con el ascenso de la lengua para formar la oclusión alveolar correspondiente a la consonante. Este ejemplo revela que el espectro acústico también proporciona información sobre la articulación de los sonidos lingüísticos y, por tanto, puede ser utilizado conjuntamente con los datos de movimiento articulatorio para una mejor comprensión de estos últimos.

6.2 Estudios.

Los datos de movimiento obtenidos mediante el sistema EMA resultan idóneos para estudiar múltiples aspectos relativos a la articulación de los sonidos del habla.

La superposición en un mismo gráfico de trayectorias X e Y correspondientes a un mismo sonido en contextos diferentes hace posible el estudio de los llamados efectos coarticulatorios. La Figura 8 demuestra que las trayectorias de movimiento lingual de ini, ana y unu varían según la identidad de la vocal. Efectivamente, puede observarse que los tres sensores de la lengua presentan una posición más avanzada (a lo largo del eje horizontal X) durante la realización de ini que durante la de ana y unu, lo cual se corresponde con el hecho de que la vocal i sea más anterior que las vocales a y u; estas diferencias de articulación vocálica se transmiten a la consonante, tal como muestra la posición de las trayectorias alrededor del punto de inflexión. La influencia vocálica también puede observarse a lo largo de la dimensión vertical Y: las trayectorias laminal (LL) y dorsal (DL) difieren por lo que respecta al grado de elevación en la progresión ini > unu > ana, lo cual está en consonancia con diferencias de grado de elevación de aquellas regiones linguales en la zona palatal; estas diferencias vocálicas se observan

asimismo durante el periodo oclusivo alrededor del punto de inflexión en las trayectorias de movimiento.

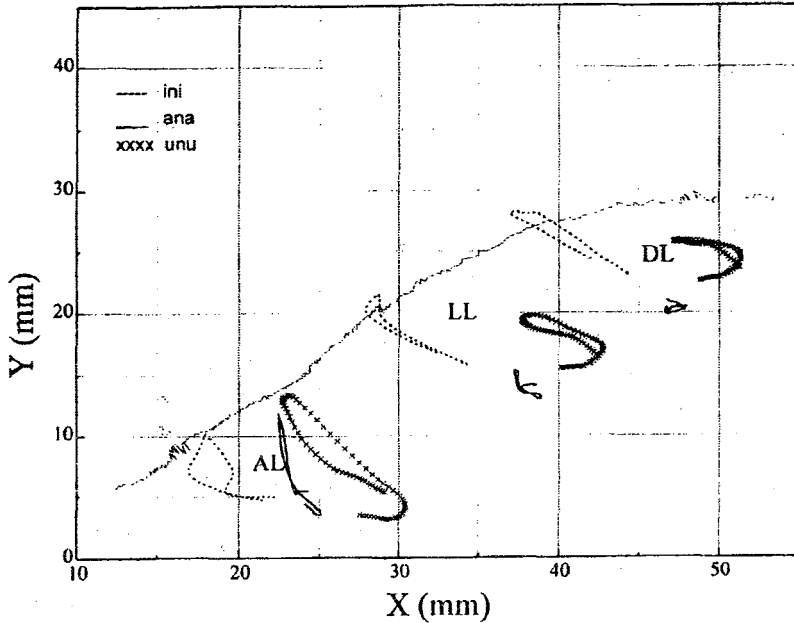


Fig. 8. Representación XY del movimiento de los sensores situados en el ápice lingual (AL), en la lámina lingual (LL) y en el dorso lingual (DL) durante la realización de las tres secuencias ini (trazo discontinuo), ana (trazo continuo) y unu (cruces). El perfil superior representa la curva del paladar.

Los efectos coarticulatorios entre sonidos contiguos también pueden ser investigados superponiendo trayectorias de movimiento horizontal o vertical. La Figura 9 representa las trayectorias verticales de diferentes articuladores correspondientes a una media de diez repeticiones de las secuencias ana y anu. Las trayectorias de movimiento han sido alineadas en el inicio de la oclusión de n (instante temporal $t=0$) determinado a partir de representaciones espectrográficas

como las de la Figura 7. La finalidad prioritaria de esta representación es medir si las diferencias de elevación entre a y u en el caso de los sensores laminal (LL) y dorsal (DL) se observan ya durante la primera vocal a de las secuencias analizadas. Los datos correspondientes a los sensores LL y DL indican que la diferencia entre a y u ya comienza a producirse en el inicio de la onda acústica y por lo tanto, al comienzo de la primera vocal (aproximadamente 50 ms antes del instante $t=0$); estos datos pueden interpretarse en el sentido de que el inicio del ascenso de la lámina y del dorso de la lengua para la realización de la segunda vocal u se manifiesta al principio de la secuencia anu. Este efecto vocálico anticipatorio demuestra que los sonidos del habla son planificados con antelación en la cadena hablada y que su manifestación articulatoria puede coincidir con la realización de uno o más sonidos lingüísticos precedentes. Los datos correspondientes al sensor AL indican que la diferencia de elevación apical entre u y a se transmite a n pero no lo hace a la vocal precedente, con lo cual el efecto coarticulatorio asociado con la vocal final no retrocede más allá del momento $t=0$ correspondiente al inicio de la oclusión. Los sensores mandibular (MI) i labial inferior (LI) también inician el movimiento vertical correspondiente a u antes de que esta vocal se manifieste en la onda acústica; el inicio de este movimiento se produce aproximadamente al mismo tiempo para ambos sensores (a unos -30 ms), lo cual concuerda con el hecho de que el labio inferior esta insertado en la mandíbula inferior. El sensor labial superior (LS) no presenta efectos vocálicos anticipatorios.

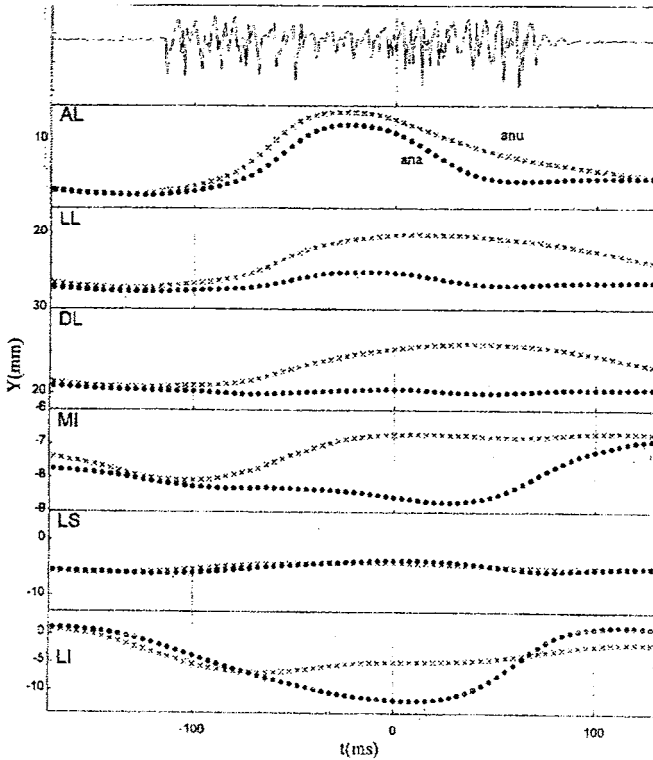


FIGURA 9. Trayectorias de movimiento vertical correspondientes a diferentes articuladores durante la emisión de las secuencias *ana* (círculos) y *anu* (cruces) para el estudio de los efectos anticipatorios asociados con la segunda vocal. Véase texto para la equivalencia de las iniciales de los articuladores implicados. El momento temporal $t=0$ corresponde al inicio del periodo oclusivo de la consonante.

La Figura 10 representa las trayectorias de movimiento horizontal correspondientes a una media de diez repeticiones de las mismas secuencias *ana* y *anu* de la Figura 9. Los sensores linguales AL, LL y DL presentan efectos anticipatorios por parte de la segunda vocal ya en el inicio de la secuencia; así, durante la primera vocal *a*, la lámina y el dorso linguales adoptan una posición más avanzada cuando la segunda

vocal es a que cuando es u. También se observan diferencias de movimiento horizontal dependientes de la segunda vocal en el caso de los dos sensores labiales LS y LI. Estos efectos indican que el gesto de protusión labial correspondiente a u empieza a producirse ya durante la primera vocal a de la secuencia; dichos efectos son independientes del movimiento mandibular (MI no presenta coarticulación en el plano horizontal).

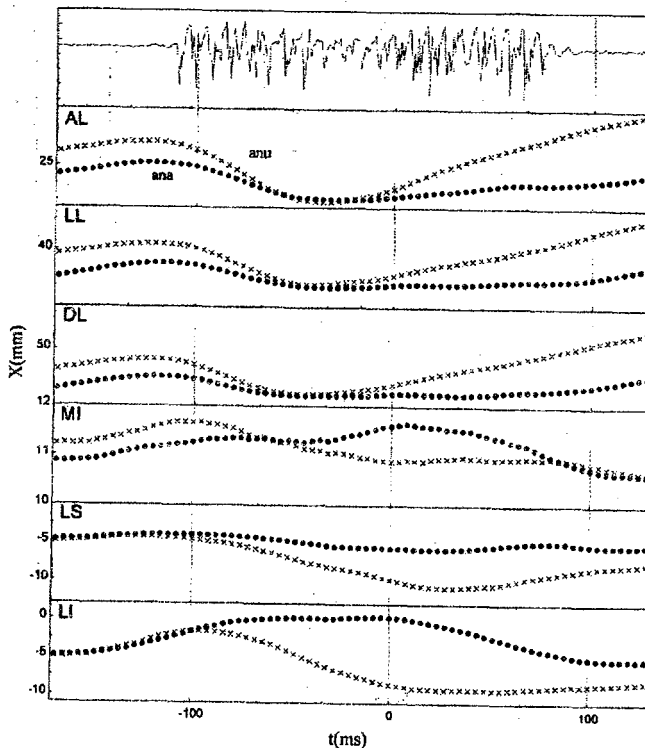


Fig. 10. Trayectorias de movimiento horizontal correspondientes a diferentes articuladores durante la emisión de las secuencias ana (círculos) y anu (cruces) para el estudio de los efectos anticipatorios asociados con la segunda vocal. Véase texto para la equivalencia de las iniciales de los articuladores implicados. El momento temporal $t=0$ corresponde al inicio del periodo oclusivo de la consonante.

BIBLIOGRAFÍA

- CARSTENS, B. (1993) *Articulograph AG100*, Göttingen.
- HARDCASTLE, W.J., JONES, W., KNIGHT, C., TRUDGEON, A. y CALDER, G. (1989) "New developments in electropalatography: A state-of-the art report", *Clinical Linguistics and Phonetics*, 3, 1-38.
- HOOLE, P. (1993) "Methodological considerations in the use of electromagnetic articulography", *Forschungsberichte des Institut für Phonetik und Sprachliche Kommunikation der Universität München*, 31, 43-64.
- KÜHNERT, B. (1993) "Some kinematic aspects of alveolar-velar articulations", *Forschungsberichte des Institut für Phonetik und Sprachliche Kommunikation der Universität München*, 31, 263-272.
- MARKEL, J.D. y GRAY, A.H. (1976) *Linear Prediction of Speech*, Berlin, Springer Verlag.
- PERKELL, J.S., COHEN, M.H., SVIRSKY, M.A., MATTHIES, M.L., GARABIETA, I. y JACKSON, M.T.T. (1992) "Measuring articulatory movements with an electro-magnetic midsagittal articulometer system", *Journal of the Acoustical Society of America*, 92, 3078-3096.
- ROUCO, A. y RECASENS, D. (1996) "Reliability of electromagnetic midsagittal articulometry and electro-palatography data acquired simultaneously", *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 3384-3389.
- SCHÖNLE, P., GRÄBE, K., WENIG, P., HÖHN, J., SCHRADER, J. y CONRAD, B. (1987) "Electromagnetic articulography: Use of alternating magnetic fields for tracking movements of multiple

points inside and outside the vocal tract", *Brain and Language*, 31, 26-35.

SCHÖNLE, P. (1988) Elektromagnetische Artikulographie, Berlin: Springer.

E.F.E. IX (1998), pp. 11-35