

# La magnetometria aplicada a l'estudi dels moviments articuladoris mitjançant sensors biomecànics

Macarena Cagigal\* i Daniel Recasens†

## Introducció

L'estudi de la posició i del moviment dels diferents òrgans articuladoris durant el procés de producció de la parla presenta un gran interès en el camp de la lingüística. En els darrers vint anys han estat adaptades tècniques com ara els ultrasons, els raigs X, l'optoelectrònica i la ressonància magnètica nuclear a l'anàlisi articulatòria. Aquest treball descriu les característiques d'una altra tècnica, l'electromagnetometria (EMA), introduïda recentment en la investigació fonètica per a l'estudi del moviment dels òrgans articuladoris (Perkell *et al.*, 1992; Recasens i Romero, 1996).

Una anàlisi acurada del desplaçament dels òrgans que intervenen en la formació dels sons de parla (llengua, llavis, mandíbula) proporciona informació sobre aspectes fonètics diversos. D'una banda, permet d'estudiar les característiques fonètiques d'una llengua o d'un parlar determinat (així com les diferències fonètiques entre llengües i entre dialectes d'una mateixa llengua) en funció dels sons i de l'estructura prosòdica d'una frase, del ritme de parla i del parlant. Així, per exemple, una anàlisi acurada de la posició i del moviment linguals pot confirmar la impressió auditiva que ens produeixen algunes diferències de pronúncia entre dialectes, a saber, la realització més oberta de la vocal *e* de mots com ara *pèl* i *vel* en valencià i en mallorquí que en el català del Principat. D'altra banda, l'estudi del moviment dels articuladors permet d'investigar en quina mesura l'activitat articulatòria associada amb un fonema determinat se sobreposa al fonema precedent o al fonema següent durant la producció d'un mot o d'una frase. Més específicament, ens informa sobre l'existència de mecanismes de planificació de fonemes atès que l'activitat articulatòria d'un fonema determinat sol anticipar-se durant la producció dels fonemes precedents (per exemple, en la seqüència *tuba* l'arrodoniment i protrusió dels llavis

ja s'inicia durant la producció de la consonant *t* precedent). L'extensió d'efectes anticipatoris d'aquestes característiques depèn, en bona mesura, de les propietats biomecàniques dels articuladors; així, l'anticipació resulta més evident en el cas d'articuladors flexibles com ara l'àpex lingual, els llavis o el vel del paladar que d'articuladors més massius com ara el dors de la llengua.

La informació fornida per dades articulatòries de moviment pot resultar útil en tecnologia de la veu (permet de millorar els sistemes de síntesi de veu artificial basats en paràmetres articuladoris) i en medicina (ajuda a diagnosticar i tractar defectes de parla).

La tècnica EMA es basa en unes bobines transmissores que generen camps magnètics alterns i aquests induïxen voltatges alterns en bobines receptores petites o sensors emplaçats en els òrgans articuladoris. Atès que, per a distàncies suficientment grans, la intensitat de camp magnètic disminueix cúbicament amb la distància a la font, és possible traduir els voltatges induïts en distàncies i, en conseqüència, determinar la posició espacial dels sensors durant el moviment dels articuladors on estan col·locats. A diferència d'altres tècniques, l'EMA no resulta perjudicial per a la salut, és d'utilització relativament senzilla, permet de realitzar múltiples gravacions d'un sol parlant, i proporciona una gran quantitat de dades simultànies de moviment lingual, labial i mandibular. A més a més, l'alta resolució espacial i l'amplada de banda (0,01 mm i 1.300 mostres/segon) d'aquesta tècnica fa possible l'obtenció de dades de moviments dels òrgans articuladoris amb molta precisió, sempre que es prenguin una sèrie de precaucions. Un factor d'error molt important pot ser la col·locació incorrecta dels sensors durant una sessió experimental, un calibratge precari, o bé la manca d'estabilitat en la temperatura del sistema.

En aquest treball s'exposa el principi bàsic de funcionament de la tècnica en consideració, i la seva aplicació a la detecció dels moviments articuladoris durant el procés de producció de la parla. També s'explica detalladament el funcionament i l'origen dels possibles factors d'error del sistema magnetomètric Articulograph AG100 de Carstens (Schönle *et al.*, 1987) que hi ha al Laboratori de Fonètica de l'Institut d'Estudis Catalans, i se n'estudia la fiabilitat i el grau de sensibilitat.

\*Macarena Cagigal (Madrid, 1967) és doctora en Física per la Universitat Autònoma de Madrid (1995). Ha col·laborat com a investigadora en el projecte ESPRIT BRA 6975 "Speech Maps" de l'Institut d'Estudis Catalans.

†Daniel Recasens (Tarragona, 1954) és catedràtic de Filologia Catalana de la Universitat Autònoma de Barcelona, doctor en Lingüística per la Universitat de Connecticut i responsable del Laboratori de Fonètica de l'Institut d'Estudis Catalans.

## Principi bàsic de funcionament: el fenomen d'inductàncies mútues

L'operació dels sensors biomecànics que són objecte d'estudi en aquest article es basa en el fenomen d'inducció magnètica. Prenguem en consideració una bobina excitadora recorreguda per un corrent altern que crea un camp magnètic variable. Una bobina receptora capta el senyal transmès provinent de l'acoblament inductiu entre les dues bobines.

Atès que el camp  $B_t$  que crea la bobina transmissora és variable en el temps, la diferència de potencial mesurada en els borns de la bobina receptora  $V_r$  és igual a la velocitat de variació del flux total ( $\Phi$ ) que travessa el seu circuit. El senyal en els borns de la bobina receptora es pot detectar en funció de la fase relativa al senyal d'excitació, i la variable que es mesura és proporcional al coeficient d'inductància mútua  $M$  que reflecteix l'acoblament inductiu entre les dues bobines:

$$V_r(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -M \frac{dI_r(t)}{dt}. \quad (1)$$

Per a distàncies suficientment grans, el camp es pot expressar com una funció que disminueix en proporció inversa al cub de la distància entre sensors i bobines transmissores (Lorrain i Corson, 1972):

$$\vec{B}_{\text{llunyà}} = \frac{\mu}{4\pi} \left[ \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right], \quad (2)$$

on el moment magnètic  $\vec{m}$  en el cas d'un solenoide orientat amb eix paral·lel a la direcció  $z$ , de  $n$  espires, longitud  $L$  i radi  $R_0$ , és  $\vec{m} = InL\pi R_0^2 \vec{z}$ . En el cas específic que les bobines transmissora i receptora es trobin dins del pla perpendicular a l'eix, el primer terme s'anulla i el camp s'expressa mitjançant la fórmula

$$\vec{B}_{\text{llunyà}} = \frac{-\mu}{4\pi} \cdot \frac{InL\pi R_0^2}{r^3} \vec{z}. \quad (3)$$

Aquesta expressió permet d'obtenir de forma aproximada la posició de la bobina receptora en relació amb la bobina transmissora en cada moment de temps.

## Aplicació a la detecció de moviments articularis

És possible dissenyar un sistema de mesura del moviment dels òrgans articularis basat en aquest fenomen d'inductàncies mútues. El principi rector del sistema és la detecció, mitjançant els sensors magnètics col·locats en aquells òrgans, dels camps que generen certes bobines transmissores. El voltatge induït en els sensors és transformat en distància i proporciona informació sobre el moviment de la llengua, dels llavis i de la mandíbula.

En la figura 1 apareix representat un esquema de la col·locació de les bobines transmissores durant la sessió experimental. Les tres bobines transmissores estan disposades en forma d'un triangle equilàter de 33 cm de

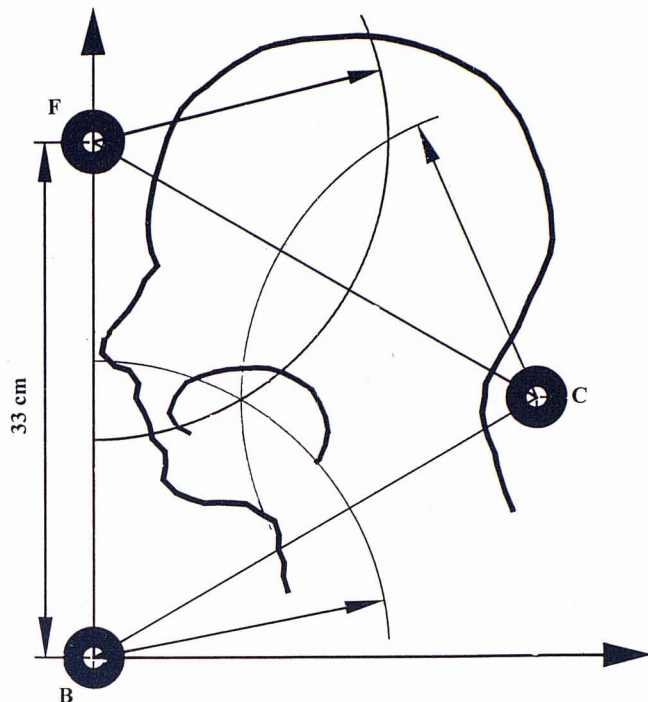


Figura 1: Posició de les bobines transmissores durant la sessió experimental. La denominació de les bobines B, F i C és explicada en el text

costat, els eixos de les quals són paral·lels entre si i estan orientats perpendicularment al pla que defineixen. Aquest pla, denominat *pla medial*, divideix la cara del parlant verticalment per la meitat. La informació que s'obté sobre el moviment dels diferents articuladors és bidimensional i està continguda dins del pla medial.

Les bobines transmissores estan emplaçades sobre un casc de metacrilat. El casc penja del sostre mitjançant una politja, i s'acobla a un suport de plàstic que envolta el cap del parlant amb una banda ajustable per tal de minimitzar-ne els moviments durant la sessió experimental. La bobina F es troba situada davant de l'os frontal, la bobina B davant del maxillar inferior o barbeta, i la bobina C darrere del coll en la zona occipital (figura 1). Cada una de les bobines opera a diferents freqüències i genera camps magnètics alterns específics, amb la qual cosa es pot determinar simultàniament la distància entre els diferents sensors i cada una de les bobines transmissores. També resulta factible l'obtenció de les coordenades XY de cada sensor dintre del pla medial, amb l'eix Y delimitat per les dues bobines davanteres F i B i l'origen situat a la bobina B.

Els sensors solen afegir-se als òrgans articularis de la manera següent (vegeu la figura 2): tres sensors sobre l'àpex lingual (AL), la làmina lingual (LL) i el dors lingual (DL), per tal d'obtenir informació relativa al moviment de les diferents regions de la llengua; un sensor

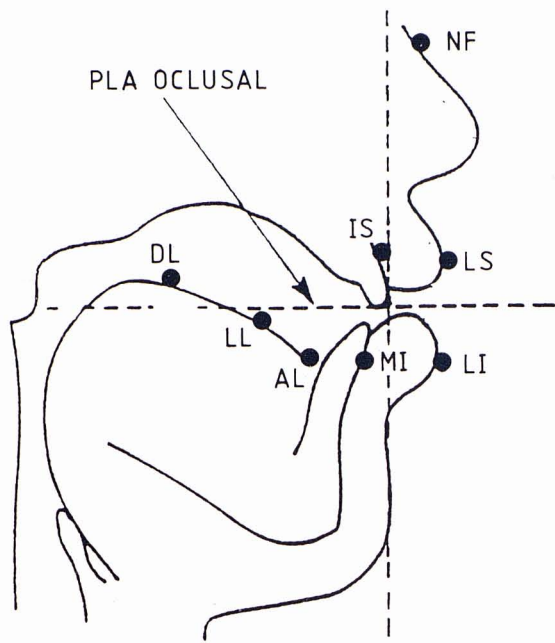


Figura 2: Possible emplaçament dels sensors en els òrgans articularis (vegeu el significat de la seva denominació en el text) i eixos del pla oclusal delimitat mitjançant línies discontinúes

sobre el llavi superior (LS) i un altre sobre el llavi inferior (LI), per tal de mesurar el moviment de protrusió labial; un sensor sobre les dents incisives de la mandíbula inferior (MI) per tal d'obtenir dades del moviment mandibular; dos sensors de referència en dos punts fixos, a saber, l'un al pont entre el nas i el front (NF) i l'altre a les incisives superiors (IS), per tal de corregir els moviments del cap durant la sessió experimental.

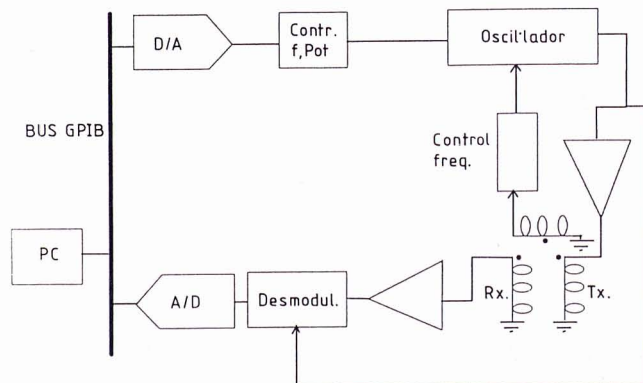


Figura 3: Esquema dels blocs del sistema experimental

## Sistema experimental

### Enregistrament de la posició espacial

La figura 3 mostra un esquema dels diferents blocs que formen part del sistema experimental.

El senyal altern induït en els sensors és condicionat, prèviament al seu processament, mitjançant uns preamplificadors. El senyal d'amplitud, que està relacionat directament amb la distància entre els sensors i les bobines transmissores, és recuperat mitjançant una desmodulació del senyal induït en les bobines receptores en sincronia amb les tres freqüències d'operació. D'aquesta manera, és possible recuperar les distàncies entre cada sensor i cada una de les tres bobines excitadores.

Els senyals de proximitat obtinguts són digitalitzats per a la seva conversió posterior en coordenades XY dins del pla medial. La connexió entre el PC, amb CPU 486 a 66 MHz, i el sistema de circuits de condicionament és efectuada mitjançant targetes estàndard bus GPIB.

La presa de dades és efectuada amb el programa AG100, que permet de seleccionar la freqüència de mostreig de la posició espacial (entre 40 i 125 mostres/segon), el nombre de sensors utilitzats en la mesura (fins a un màxim de 10) i la possibilitat de gravació del senyal acústic. Aquest programa també mostra en pantalla la posició en temps real de cada un dels sensors en relació amb les bobines transmissores, la qual cosa permet de verificar el funcionament correcte del sistema durant el procés de mesura.

### Bobines transmissores

Cada transmissor consta de dos bobinatges concèntrics, l'un primari (extern) i l'altre secundari (intern). El secundari porta incorporat un condensador en paral·lel. L'objectiu fonamental del circuit transmissor és generar camps relativament intensos ( $\sim 2$  mG), amb freqüències molt precises i estables. Amb aquesta finalitat s'excita el primari mitjançant un amplificador de potència; al seu torn, el bobinatge secundari genera un senyal induït molt selectiu amb la freqüència desitjada atès que es tracta d'un circuit LC amb Q alta. El senyal de sortida d'aquest circuit és utilitzat per realimentar el bobinatge primari i corregir d'aquesta manera, les possibles desviacions freqüencials.

### Bobines receptores o sensors

És important que els sensors adherits als articuladors siguin prou petits per tal que no presentin interferències mútues. Efectivament, s'ha demostrat experimentalment que la proximitat o contacte físic entre dos sensors altera el resultat de la mesura. La seva dimensió no pot excedir els 4 mm de diàmetre i els 2,5 mm d'alçada (Perkell *et al.*, 1992). El nostre sistema experimental està proveït de sensors formats per bobines uniaxials de 2 mm de diàmetre.

Finalment cal assegurar-se que els cables de connexió dels sensors estiguin apantallats i situats lluny de les bobines transmissores per tal d'evitar possibles interferències electromagnètiques que pertorbarien els senyals que són objecte d'estudi. Si els cables no s'apantallen correctament, el voltatge mesurat és alterat per un

acoblament addicional provinent dels cables i, per tant, no prové únicament de l'acoblament inductiu entre les bobines excitadora i receptora.

## Camp efectiu

Per tal que hi hagi una relació directa entre la distància entre sensors i bobines transmissores, i el voltatge induït, tots els sensors han d'estar situats dins del pla medial, amb els eixos paral·lels als eixos de les bobines transmissores. Si hi ha un cert grau de desalineament, el voltatge induït es redueix per un factor  $\cos \theta$  (on  $\theta$  és l'angle que formen els eixos de les bobines transmissora i receptora, anomenat *angle de desalineament* o *angle de "tilt"*), la qual cosa fa que la distància mesurada resulti superior a la distància real.

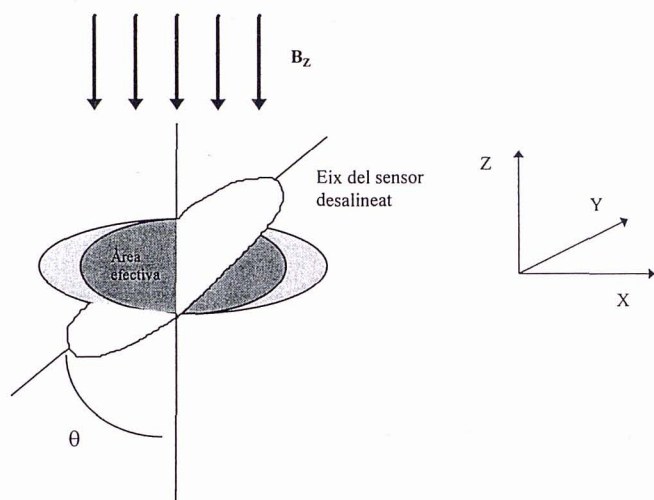


Figura 4: Imatge expandida d'un sensor d'una espira. L'àrea efectiva és la projecció de l'espira en el pla XY quan hi ha un angle de desalineament  $\theta$

En la figura 4 s'observa com el flux de camp magnètic que travessa la secció d'una espira és més gran al comprès dins de la secció eficaç (zona ombrejada) quan els eixos de les bobines transmissora i receptora no estan disposats paral·lelament.

La fórmula (3) reflecteix una dependència espacial de la intensitat de camp magnètic, que ens permet de considerar  $B$  constant en punts propers entre si i suficientment allunyats de les seves fonts. Amb això, el flux pot ser expressat de la manera següent:

$$\Phi = B \pi r_0^2 \cos \theta, \quad (4)$$

on  $B$  és el valor del camp magnètic en el centre de la bobina receptora,  $\pi r_0^2$  la superfície d'aquesta bobina i  $\theta$  l'angle entre els eixos de les bobines transmissora i receptora. La substitució de l'expressió (3) en l'expressió

(4) permet d'obtenir l'expressió següent:

$$\Phi = -\frac{\mu}{4\pi} \frac{InL\pi R_0^2}{r^3} \pi r_0^2 \cos \theta. \quad (5)$$

Quan hi ha un angle  $\theta$  entre els eixos de les bobines transmissora i receptora, la tensió mesurada en els borns de la bobina receptora està afectada per un factor  $\cos \theta$ :

$$V_r(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = \pi r_0^2 \cos \theta \frac{\mu}{4\pi} \frac{nL\pi R_0^2}{r^3} \frac{dI_r(t)}{dt}, \quad (6)$$

on el factor que multiplica  $dI_r/dt$  pot ser identificat com a coeficient d'inductància mútua  $M$ .

## Correcció de l'angle

En el sistema format per les tres bobines transmissores podem interpretar les distàncies mesurades entre sensor i transmissor com a tres cercles els centres dels quals són les bobines respectives. Quan l'eix d'un sensor determinat està perfectament alineat amb els eixos de les bobines transmissores, aquests cercles s'intersequen en el punt on se situa el sensor, és a dir, les distàncies entre el sensor i cada un dels transmissors,  $r_F$ ,  $r_B$  i  $r_C$ , es poden circumscriure dins d'un cercle que també circumscriu el triangle equilàter que formen les bobines transmissores (figura 5a). En aquest cas, les tres distàncies mesurades ( $r_F$ ,  $r_B$  i  $r_C$ ) corresponen a les distàncies reals ( $R_F$ ,  $R_B$  i  $R_C$ ). Quan hi ha un cert grau de desalineament, els cercles no s'intersequen en un punt atès que les distàncies mesurades són majors en un factor  $\cos \theta_z^{1/n}$  ( $n \sim 3$ ) a les distàncies reals ( $R_F$ ,  $R_B$  i  $R_C$ ) entre sensor i transmissors (figura 5b).

És possible corregir l'error causat pel desalineament o *tilt* introduint en el programa de mesura un algorisme que reescali proporcionalment les tres distàncies a llurs valors reals. Amb aquesta finalitat es multipliquen els senyals per un factor de correcció o factor de *tilt* proporcional a  $\cos \theta^{1/n}$ , que es calcula dividint la distància real entre la distància mesurada ( $R/r$ ):

$$r \cos \theta^{1/n} = R, \quad (7)$$

on  $r$  i  $R$  són la distància mesurada i la real respectivament, i  $\theta$  l'angle de desalineament.

L'experimentador pot visualitzar el moviment dels sensors i el seu grau de desalineament durant la gravació de les dades, la qual cosa permet de corregir qualsevol anomalia abans de portar a terme l'experiment. El factor de *tilt* haurà de ser 1 en el cas ideal, és a dir, quan l'eix de la bobina receptora o sensor està perfectament alineat amb l'eix de la bobina transmissora.

Els sensors col·locats sobre els articuladors durant la realització d'un experiment disten entre 10 cm i 25 cm aproximadament de les bobines transmissores. Dins d'aquest rang de distàncies, l'error de mesura ocasionat per l'absència de correcció del desalineament és inferior al 6% per a angles no superiors als 20°.

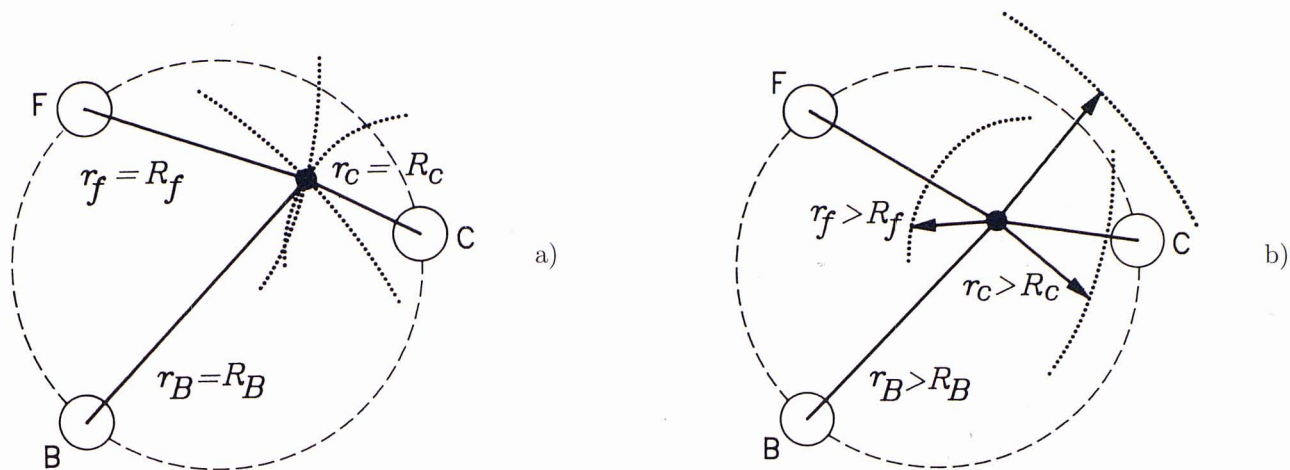


Figura 5: Il·lustració de les distàncies mesurades ( $r_B, r_F, r_C$ ) en relació amb les distàncies reals ( $R_B, R_F, R_C$ ): a) els cercles que representen les distàncies mesurades s'intersequen en el punt on se situa el sensor quan no hi ha angle de desalineament, b) si hi ha angle de desalineament, les línies no s'intersequen en un punt. Les distàncies mesurades són superiors a les distàncies reals en un factor  $\cos \theta^{-1/n}$

## Calibratge

La transformació dels voltatges induïts en distàncies es porta a terme en virtut de la relació no lineal que hi ha entre ambdós paràmetres ( $V_i \propto r_i^{-n}$  amb  $n = 3$ ). Malgrat que el valor teòric de l'exponent és  $n = 3$ , és necessari efectuar el calibratge del sistema abans de realitzar un experiment per tal d'obtenir els exponents que caracteritzen els canvis de la intensitat del camp en funció de la distància. Un cop obtinguts els tres exponents corresponents a cada una de les bobines transmissores, es construeixen unes taules que contenen informació sobre les diferents posicions espacials en relació amb la intensitat del camp.

Els exponents fornits pel calibratge han de ser propers al valor teòric 3,00; quan els exponents s'allunyen considerablement d'aquest valor, l'error depèn de la distància del sensor en relació amb el centre del camp magnètic. Un test experimental demostra que, per a desviacions superiors a tres dècimes, l'error mesurat és superior al 2% (2 mm) quan el sensor es troba situat a 10 cm del centre del camp magnètic.

## Estabilitat en temperatura

La lectura dels sensors pot ser afectada per la temperatura dels amplificadors de les bobines transmissores quan encara no ha assolit el règim estacionari.

S'han efectuat mesures durant el procés d'escalfament de l'articulògraf per comprovar experimentalment en quina mesura el senyal és afectat per la manca d'estabilitat en temperatura del sistema. L'articulògraf tarda uns 140 minuts a assolir l'equilibri en temperatura, quan aquesta marca valors propers a  $60^\circ\text{C}$ . L'efecte tèrmic pot ocasionar errors de fins a 8% (1 cm), que excedeixen sobradament el nivell de soroll (inferior a 0,04%).

## Anàlisi de dades

Part del procés de processament de dades consisteix en la correcció dels moviments del cap durant la sessió experimental. Atès que aquests moviments es reflecteixen en els sensors de referència situats en punts fixos o immòbils, a saber, el sensor NF (situat entre el nas i el front) i el sensor IS (situat sobre les incisives superiors), caldrà ajustar la posició de la resta de sensors al sistema de referència format per aquells dos sensors. El programa d'adquisició de dades pren com a eix  $Y$  l'eix determinat per les bobines F (davant de la part superior del front) i B (davant del maxil·lar inferior), i aquesta última bobina com a origen de coordenades. Per tal d'efectuar la correcció dels moviments del cap és necessari realitzar una translació al sensor IS (situat a les incisives superiors), i una rotació d'angle  $\alpha$  format per l'eix  $Y$  i la línia que uneix el sensor NF amb el sensor IS. Les noves coordenades d'un sensor qualsevol, com ara el sensor AL ( $X'_{AL}, Y'_{AL}$ ), són determinades per les expressions següents:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{x_{NF} - x_{IS}}{y_{NF} - y_{IS}} \right), \quad (8)$$

$$x'_{AL} = (x_{AL} - x_{IS}) \cos \alpha - (y_{AL} - y_{IS}) \sin \alpha, \quad (9a)$$

$$y'_{AL} = (x_{AL} - x_{IS}) \sin \alpha + (y_{AL} - y_{IS}) \cos \alpha. \quad (9b)$$

Un cop efectuada la correcció cal referir les dades a un sistema de coordenades universal que no depengui de la fisonomia del parlant. Amb aquesta finalitat, les dades de moviment són referides al sistema de coordenades del pla oclusal l'eix  $X$  del qual correspon a la línia natural de l'horitzontal de la llengua i l'origen del qual es troba entre les incisives superiors i inferiors. Per tal de referir les dades al pla oclusal es repeteix un procediment similar al realitzat per a la correcció dels

moviments del cap durant la sessió experimental. Suposant que la situació de l'origen del pla oclusal equival a  $(p_1, p_2)$ , les coordenades finals del sensor AL ( $x''_{AL}$ ,  $y''_{AL}$ ) corresponen a les expressions següents:

$$x''_{AL} = (x_{IS} - x_{AL}) \cos(\alpha - \beta) + (y_{IS} - y_{AL}) \sin(\alpha + \beta) - p_1 \cos \beta + p_2 \sin \beta \quad (10a)$$

$$y''_{AL} = (x_{AL} - x_{IS}) \sin(\alpha + \beta) - (y_{AL} - y_{IS}) \cos(\alpha - \beta) - p_1 \sin \beta - p_2 \cos \beta, \quad (10b)$$

on  $\beta$  és l'angle que formen els sensors de referència (NF i IS) amb l'eix Y del pla oclusal.

Durant l'articulació dels sons de parla, el desplaçament mínim dels articuladors és de l'ordre de 0,5 mm (Perkell *et al.*, 1992). Malgrat que alguns articuladors es mouen dins d'una amplada de banda bastant baixa ( $\sim 15$  Hz), d'altres ho fan molt més ràpidament. Si es vol obtenir tota la informació, convé que l'amplada de banda sigui de 500 Hz.

En conseqüència, un sistema experimental vàlid per a la detecció del moviment dels òrgans articuladors ha de tenir una resolució espacial superior a 0,5 mm, i una resolució temporal que superi els 500 Hz. La precisió espacial de l'articulògraf de l'Institut d'Estudis Catalans, que és de 0,01 mm, supera amb escreix el valor desitjat (0,5 mm). No obstant això, el sistema experimental té un soroll intrínsec romanent relacionat amb l'amplada de banda del senyal que promou un error residual en les mesures, amb desviacions estàndard inferiors a  $\sigma = 0,04$  mm. Pot netejar-se el soroll del senyal mitjançant un filtre de pas baix amb una finestra quadrada variable que depèn de l'amplada de banda utilitzada durant la mesura.

S'estima que la precisió del sistema experimental descrit en aquest article, és a dir, 0,04 mm, és superior a la d'altres equips; a més a més, el sistema en consideració és força fiable pel que fa al procés d'enregistrament de dades i a llur transformació en distàncies.

## Alguns resultats

La superposició de trajectòries X i Y corresponents a un mateix so en contextos fonètics diferents permet d'estudiar els efectes entre sons adjacents en la cadena parlada (vegeu "Introducció"). Les dades de les seqüències *ini*, *ana* i *unu* de la figura 6 exemplifiquen en quina mesura la identitat de la vocal influencia les trajectòries de moviment lingual al llarg de la seqüència sencera. Efectivament, pot observar-se que els tres sensors de la llengua presenten una posició més avançada (al llarg de l'eix horitzontal X) durant la realització de *ini* que durant la realització de *ana* i *unu* per tal com la vocal *i* és més anterior que les vocals *a* i *u*; el fet que aquestes diferències s'observin en el punt d'inflexió de les trajectòries indica que les característiques articulatòries de

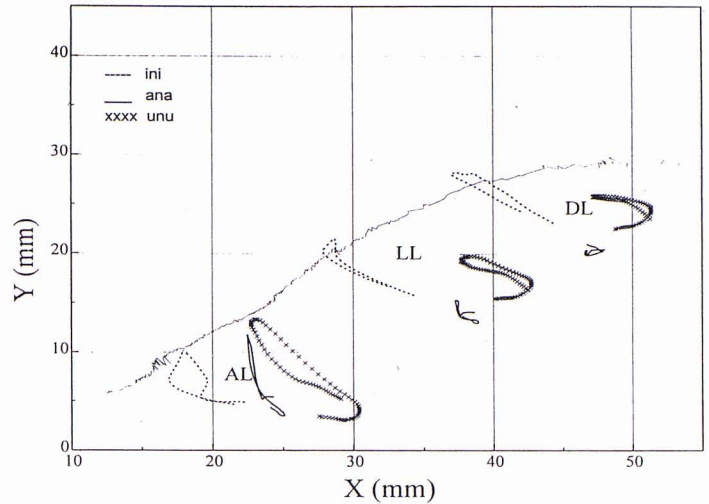


Figura 6: Representació XY del moviment dels sensors situats en l'àpex lingual (AL), en la làmina lingual (LL) i en el dors lingual (DL) durant la realització de les tres seqüències ini (traç discontinu), ana (traç continu) i unu (creus). La corba del paladar apareix en la part superior de les trajectòries de moviment

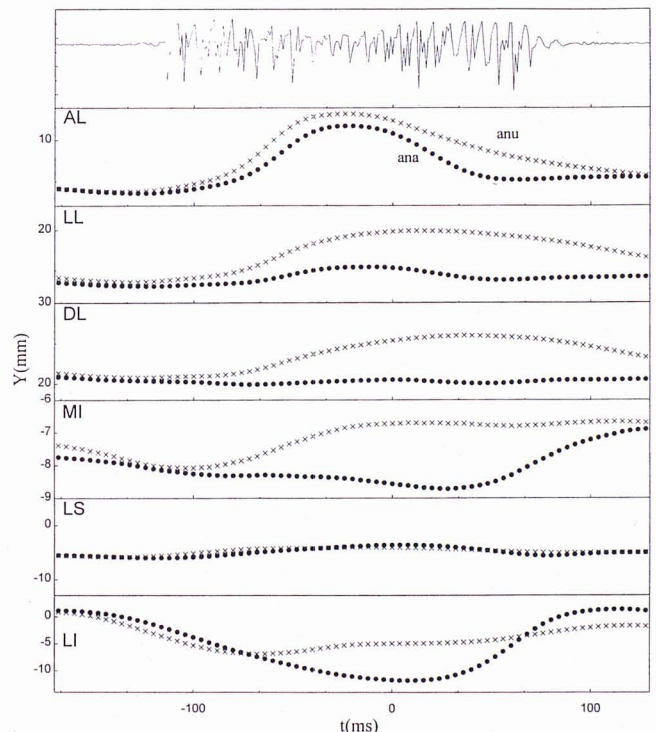


Figura 7: Trajectòries de moviment vertical corresponents a diferents articuladors durant l'emissió de les seqüències ana (cercles) i anu (creus) per a l'estudi dels efectes anticipatoris associats amb la segona vocal. Vegeu el text pel que fa a l'equivalència de les inicials dels articuladors implicats. El moment temporal  $t = 0$  correspon a l'acabament del període oclusiu de la consonant

les vocals es manifesten durant el període consonàntic. La influència vocàlica també es fa palesa al llarg de la dimensió vertical  $Y$ : les trajectòries laminal (LL) i dorsal (DL) difereixen pel que fa al grau d'elevació en la progressió *ini* > *unu* > *ana*, la qual cosa s'adiu amb diferències de grau d'elevació d'aquelles regions linguals en la zona palatal; aquestes diferències vocàliques s'observen durant el període oclusiu en el punt d'inflexió de les trajectòries de moviment.

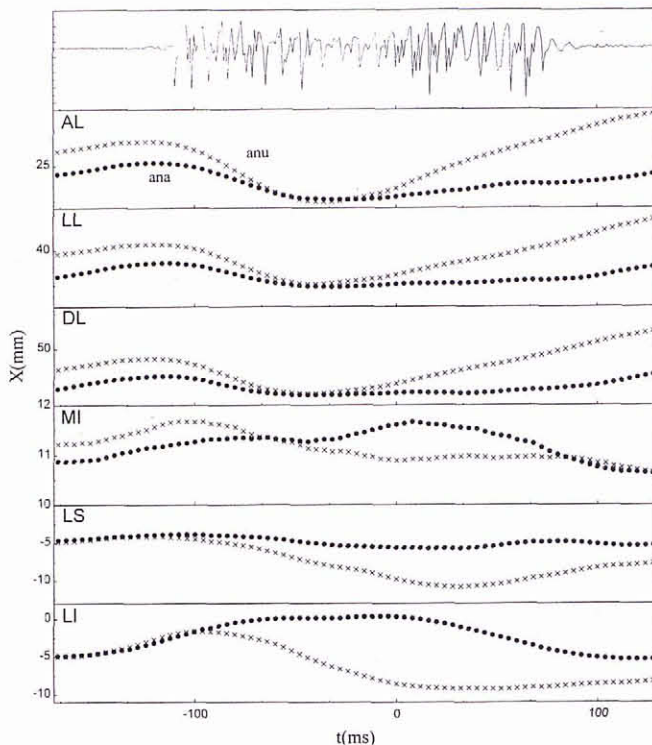


Figura 8: Trajectòries de moviment horitzontal corresponents a diferents articuladors durant l'emissió de les seqüències *ana* (cercles) i *anu* (creus) per a l'estudi dels efectes anticipatoris associats amb la segona vocal. Vegeu el text pel que fa a l'equivalència de les inicials dels articuladors implicats. El moment temporal  $t = 0$  correspon a l'acabament del període oclusiu de la consonant

La superposició de trajectòries de moviment horitzontal i vertical també permet d'investigar els efectes consonàntics entre sons adjacents. La figura 7 representa les trajectòries corresponents a una mitjana de deu repeticions de les seqüències *ana* i *anu*. Les trajectòries han estat alineades a l'acabament de l'oclusió de *n* (moment temporal  $t = 0$ ). La finalitat prioritària d'aquesta representació és mesurar si les diferències d'elevació entre *a* i *u* en el cas dels sensors laminal (LL) i dorsal (DL) s'observen ja durant la consonant precedent *n* i, fins i tot, durant la primera vocal *a*. Les dades corresponents als sensors LL i DL indiquen que la diferència entre *a* i *u* ja comença a produir-se a l'inici de l'ona acústica i, per tant, al començament de la primera vocal (aproximadament 50 ms abans del moment  $t = 0$  segons tests estadístics de significació); aquestes dades poden ser interpretades en el sentit que l'ascens de la làmina i del dors de la llengua per a la realització de la segona vocal *u* comença a produir-se a l'inici de la seqüència *anu*. Aquest efecte vocàlic anticipatori demostra que els sons de parla són planificats amb antelació en la cadena parlada i que la seva manifestació articulatòria pot coincidir amb la realització d'un o més sons lingüístics precedents. Les dades corresponents al sensor AL indiquen que la diferència apical entre *u* i *a* també es transmet a *n* i a la vocal precedent, si bé resulta no significativa abans del període oclusiu. Els sensors mandibular (MI) i labial inferior (LI) també inicien el moviment vertical corresponent a *u* abans que aquesta vocal aparegui en l'ona acústica; l'inici d'aquest moviment té lloc aproximadament al mateix temps per a ambdós sensors (a uns -30 ms segons tests estadístics), la qual cosa s'adiu amb el fet que el llavi inferior està inserit en la mandíbula inferior. El sensor labial superior (LS) no presenta efectes vocàlics anticipatoris.

La figura 8 representa les trajectòries de moviment horitzontal corresponents a una mitjana de deu repeticions de les mateixes seqüències *ana* i *anu* de la figura 7. Els sensors linguals AL, LL i DL presenten efectes anticipatoris de la segona vocal ja al començament de la seqüència; així, durant la primera vocal *a*, la làmina i el dors linguals adopten una posició més avançada quan la segona vocal és *a* que quan és *u*. També s'observen diferències de moviment horitzontal associades amb la segona vocal en el cas dels dos sensors labials LS i LI. Aquests efectes indiquen que el gest de protrusió labial corresponent a *u* comença a produir-se ja durant la primera vocal *a* de la seqüència; aquest efectes són independents del moviment mandibular (MI no presenta coarticulació en el pla horitzontal).

La informació presentada en aquest article permet de concloure que la magnetometria basada en sensors biomecànics és una tècnica idònia per a l'anàlisi dels moviments articulatoris. La fiabilitat de les dades de moviment obtingudes amb aquest sistema experimental depèn, però, del fet que es prenguin en consideració tota una sèrie de mesures, a saber, possibles interferències entre sensors, l'angle de desalineament entre els eixos dels sensors i els eixos de les bobines transmissores, la magnitud dels exponents fornits pel calibratge, l'estabilitat en temperatura, la correcció dels moviments del cap, i l'estimació de l'angle que permet de referir les dades al pla oclusal.

## Conclusions

Agrair a la informació presentada en aquest article permet de concloure que la magnetometria basada en sensors biomecànics és una tècnica idònia per a l'anàlisi dels moviments articulatoris. La fiabilitat de les dades de moviment obtingudes amb aquest sistema experimental depèn, però, del fet que es prenguin en consideració tota una sèrie de mesures, a saber, possibles interferències entre sensors, l'angle de desalineament entre els eixos dels sensors i els eixos de les bobines transmissores, la magnitud dels exponents fornits pel calibratge, l'estabilitat en temperatura, la correcció dels moviments del cap, i l'estimació de l'angle que permet de referir les dades al pla oclusal.

## Agraïments

Voldríem agrair al Dr. Josep Enric Llebot els seus comentaris sobre aquest article.

## Referències

- LORRAIN, P. i CORSON, D. R., *Campos y ondas electromagnéticos*, Selecciones Científicas (1972).
- PERKELL, J. S., COHEN, M. H., SVIRSKY, M. A., MATTHIES, M. L., GARABIETA, I. i JACKSON, M. T. T., Measuring articulatory movements with an electro-magnetic midsagittal articulometer system, *Jour. of the Acoustical Soc. of America*, **92** (6), 3.078-3.096 (1992).
- RECASENS, D. i ROMERO, J., An EMMA study of segmental complexity in alveolopalatal and palatalized alveolars, *Phonetica*, **54**, 43-58 (1997).
- SCHÖNLE, P., GRÄBE, K., WENIG, P., HÖHNE, J., SCHRADER, J. i CONRAD, B., Electromagnetic articulo-graphy: Use of alternating magnetic fields for tracking movements of multiple points inside and outside the vocal tract, *Brain and Language*, **31**, 26-35 (1987).

## Revista de **f í s i c a**

**La Revista de Física**  
és una publicació  
de la Societat Catalana de Física.

El seu antecedent immediat  
són els Treballs de Física,  
sèrie iniciada al 1979,  
primera revista especialitzada en Física  
publicada a Catalunya,

**La Societat Catalana de Física**  
és una filial de l'Institut d'Estudis Catalans  
creada el 1986 a partir de la Secció de Física  
de l'antiga Societat Catalana de Ciències  
la qual, al seu torn, havia estat fundada l'any 1931.

La Societat Catalana de Física és, doncs,  
una entitat jove  
que té les seves arrels en la  
tradició més genuïna  
de la recerca en Física  
a Catalunya.

