Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2011
Coimbra, 14 a 17 de Junho, 2011
© APMTAC, Portugal, 2011

REQUISITOS E CONDICIONANTES DA IMAGEM POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NO ESTUDO DA FALA HUMANA

Sandra R. Ventura[1]*, Diamantino R. Freitas[2], Isabel M. Ramos[3], João Manuel R. S. Tavares[4]

1: Área Técnico-científica da Radiologia da Escola Superior de Tecnologia da Saúde do Porto – Instituto Politécnico do Porto
R. Valente Perfeito 322, 4400-330 Vila Nova de Gaia, Portugal
e-mail: **sandra.rua@eu.ipp.pt**

2: Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal
e-mail: **dfreitas@fe.up.pt**

3: Directora do Serviço de Radiologia do Hospital S. João
Faculdade de Medicina, Universidade do Porto
Al. Prof. Hernâni Monteiro, 4200-319 Porto
e-mail: **radiologia.hsj@mail.telepac.pt**

4: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto / Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal
e-mail: **tavares@fe.up.pt**

Palavras-chave: Produção da Fala, Imagem Médica, Caracterização Funcional, Modelação do Tracto Vocal, Análise de Imagem

Resumo. *A produção da fala tem suscitado o interesse crescente da comunidade científica e, em particular, da Engenharia, pela necessidade de obter modelos do tracto vocal para a concepção de sistemas de síntese, reconhecimento e codificação da fala. A obtenção de imagens seccionais da anatomia do tracto vocal é um recurso essencial para a obtenção de modelos físicos morfológico-dinâmicos. O desenvolvimento da imagem por ressonância magnética (IRM) veio abrir novos horizontes, pelas enormes potencialidades que apresenta comparativamente a outras técnicas de imagem. O principal objectivo deste trabalho é discutir quais os requisitos e condicionantes da IRM para o estudo da fala humana. Embora estas condicionantes não possam ser totalmente ultrapassadas com sucesso, algumas podem ser minimizadas, exigindo para isso, para além dos procedimentos necessários, esforços de equipas multidisciplinares. Adicionalmente, a análise e processamento das imagens por ressonância magnética carecem de ainda de soluções computacionais que permitam responder às necessidades específicas dos estudos da fala.*

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos da produção da fala, com recurso à imagem por Ressonância Magnética (IRM), surgem a partir de 1980, e estavam limitados exclusivamente à observação estática dos articuladores [1-3]. Desde então, os avanços tecnológicos crescentes aliados ao desenvolvimento e maior divulgação dos sistemas de IRM permitiram um incremento na sua utilização, quer clínica como em estudos de investigação, nomeadamente na caracterização funcional da fala [4-9]. As potencialidades da utilização da IRM, neste âmbito, permitem uma diversidade de aplicações, em Engenharia Biomédica [10], em Fonética e em Medicina [11].
Actualmente, a ressonância magnética é, de todas as técnicas de imagem, a mais promissora permitindo a demonstração, com elevada resolução de contraste, de todo o tracto vocal, e posteriormente com o desenvolvimento de sequências mais rápidas e das técnicas de sincronismo, o estudo da dinâmica dos articuladores envolvidos na produção da fala [12-14].
Assim, o principal objectivo deste trabalho é discutir quais os requisitos e condicionantes da IRM para o estudo da fala humana, e ilustrar a utilização *versus* aplicação da IRM na caracterização morfológica do tracto vocal durante a produção de cinco vogais do Português.

1.1. Requisitos para estudo da fala humana

Dentro do mecanismo da produção da fala, distingue-se a articulação, pois graças ao movimento (dinâmica) e alteração da forma (morfologia) dos órgãos do tracto vocal também conhecidos por articuladores, são produzidos diferentes sons, com propriedades acústicas distintas [15].
A junção do conhecimento morfológico à informação dinâmica do tracto vocal é, por isso, muito ambicionada quer pela fonética, que se dedica ao estudo da produção dos sons, como pela engenharia na concepção e desenvolvimento de sistemas para síntese e reconhecimento da fala.
Tridimensionalmente, o tracto vocal estende-se desde a glote aos lábios e apresenta uma forma complexa delimitada por paredes rígidas e moles, Figura 1, cuja anatomia é variável, de indivíduo para indivíduo, pois depende dos seguintes factores:

- Altura da maxila e mandíbula relativamente à altura da faringe;
- Mobilidade da mandíbula; e,
- Tamanho da língua.

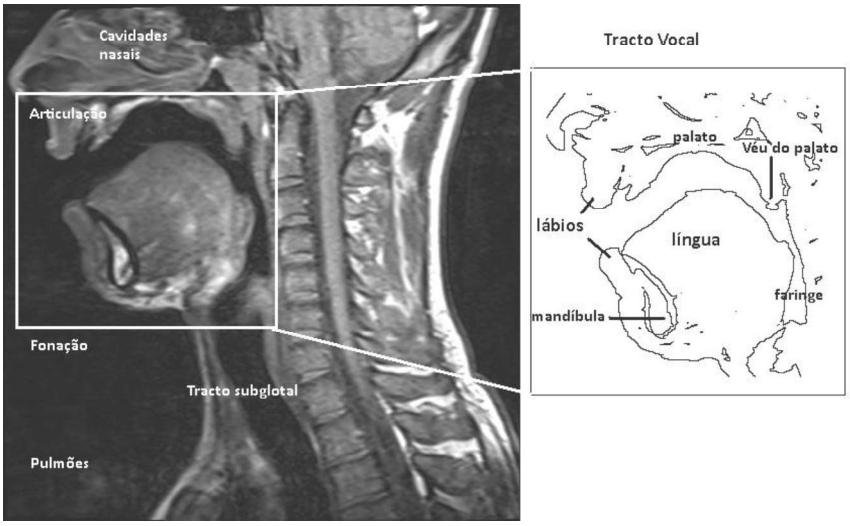

Figura 1.Corte sagital de RM e respectiva segmentação e identificação do tracto vocal e respectivos articuladores.

A língua é o articulador mais importante, pois altera grande parte da forma do tracto vocal. A sua deformação determina a qualidade vocálica e permite a produção das consoantes palatais, velares e faríngeas. Os lábios deformam o término do tracto vocal, contribuindo para a produção das vogais e das consoantes labiais. Quer a língua como os lábios estão fixos à mandíbula. O véu do palato controla a abertura e fecho da passagem velofaríngea permitindo a diferenciação entre sons nasais e orais. Os músculos constritores da faringe permitem ajustar a largura lateral da cavidade faríngea, e também contribuem para a articulação das vogais e consoantes mais posteriores.

O palato e os dentes, que constituem o osso maxilar formam uma parede fixa do tracto vocal, e ainda que não sejam "verdadeiros" articuladores, desempenham um papel crucial pois servem de ponto de referência para muitas posições articulatórias (definindo o ponto de aproximação ou contacto com a língua).

As características anatómicas e funcionais do tracto vocal são complexas, além de que os articuladores possuem um elevado grau de mobilidade; estas particularidades exigem assim, o recurso a métodos e técnicas mais avançadas e robustas para a sua observação e análise. Por um lado, esta técnica deve fornecer imagens detalhadas em qualquer orientação de todos os articuladores e, por outro, ter uma resolução temporal que permita o estudo da dinâmica articulatória (cuja frequência de amostragem mínima é de 20 Hz, de acordo com [13]).

A fala é uma actividade humana motora única e individual, pois o mesmo indivíduo é praticamente incapaz de produzir um som várias vezes da mesma forma (variabilidade intra-sujeito). Acresce ainda que, para além das diferenças anatómicas entre indivíduos, que cada um adopta estratégias diferentes no controlo do tracto vocal, determinando a variabilidade inter-sujeitos do sinal acústico [7].

Apesar da análise funcional da fala poder ser efectuada com recurso a várias técnicas, são sem dúvida as técnicas imagiológicas, que têm tido maior utilização e desenvolvimento

nas últimas décadas, nomeadamente a IRM.
Assim, os principais requisitos da IRM para estudo da fala são os seguintes:

- Visualização de todos os articuladores, em qualquer plano ou orientação, em situações estáticas e dinâmicas;
- Estudo bidimensional e tridimensional do tracto vocal;
- Caracterização morfológica e funcional dos articuladores;
- Extracção de medidas quantitativas acerca da posição dos articuladores e áreas seccionais para modelação do tracto vocal e posterior síntese da fala; e,
- Permitir para avaliação funcional de pacientes com perturbações articulatórias, do ponto de vista clínico.

1.2. Condicionantes da IRM

Os sistemas de RM embora possuam especificidades técnicas próprias quer de *hardware* quer de *software*, são caracterizados essencialmente pela sua potência de campo magnético. Para fins clínicos, a potência de campo magnético dos equipamentos de RM disponíveis varia entre 0.2 a 3 Tesla; já para fins de investigação, são utilizadas potências de campo magnético acima de 7 Tesla. Em Portugal tem-se assistido à implementação gradual e amplificação dos sistemas de RM; no entanto, o elevado custo de instalação e manutenção dos equipamentos constitui ainda um importante condicionalismo à sua utilização. Este custo aumenta de acordo com a potência de campo, sendo os equipamentos de 3.0 Tesla disponíveis ainda em número reduzido (baixa acessibilidade).
Para além das contra-indicações relacionadas com a instrumentação utilizada nestes sistemas (o campo magnético e gradientes) existem algumas condicionantes que assumem grande relevância no estudo da produção da fala, nomeadamente:

- A posição de decúbito dorsal imposta aos sujeitos durante um exame de RM: resultando na alteração postural de vários órgãos [16, 17];
- A colaboração e algum esforço dos pacientes exigidos: como se trata de uma aquisição durante uma actividade motora – a fala, de forma a minimizar o cansaço dos mesmos, o número de sons a estudar (*corpus* da fala) deve ser escolhido criteriosamente face à perturbação articulatória em causa;
- A não identificação dos dentes: pela pouca quantidade de hidrogénio que apresentam, os dentes surgem com similar sinal que as cavidades de ressonância do tracto vocal, condicionando o rigor das medidas articulatórias;
- O elevado ruído acústico produzido pelos gradientes: prejudica o registo acústico durante o exame, inviabilizando a análise do sinal da fala e sua correlação com as sequências de imagens obtidas; e,
- Inexistência de dispositivos de sincronização ou *trigger* específicos para a fala.

Vários estudos têm sido dedicados ao registo acústico do sinal da fala durante a RM, de forma a permitir a correlação entre a forma do tracto vocal e o sinal acústico produzido, nomeadamente através das técnicas de:

- Pós-sincronização: ou seja, fazendo a gravação da fala depois da aquisição de RM. Esta técnica é menos desejável pois a repetição de um som de fala nunca é idêntica

às anteriores (pela variabilidade intra-sujeito) [18];

- Através do intercomunicador apenas para confirmação do som produzido pois a qualidade do som produzida por este dispositivo é muito pobre [5, 19, 20]; e,
- Simultaneamente à aquisição de RM: através de um microfone de fibra óptica com recurso a técnicas de cancelamento do ruído; esta técnica tem a vantagem acrescida de poder paralelamente servir de *trigger* para o início das sequências dinâmicas [21-23].

Relativamente à identificação dos dentes, alguns autores têm proposto algumas alternativas, nomeadamente através da utilização de moldes ou marcas dentárias [24, 25], ou líquidos para preencher a cavidade oral [26], e que posteriormente são sobrepostos ou subtraídos, respectivamente, às imagens de RM, usando estruturas ósseas para referenciação e registo espacial.

Este artigo está organizado em quatro secções. A secção que se segue descreve a metodologia usada neste trabalho, incluindo a instrumentação, protocolo e técnicas de aquisição e análise de imagem usadas. Os resultados são focados na secção seguinte, através da exibição das imagens 2D e 3D de RM geradas para cada som e respectivos os modelos tridimensionais. Finalmente são apresentadas as principais conclusões do trabalho e apontadas algumas perspectivas futuras.

2. METODOLOGIA

De uma forma geral, os estudos por RM do tracto vocal compreendem as seguintes etapas:

a) Aquisição e reconstrução das imagens de RM com o mínimo de artefactos e ruído, de acordo com os princípios padrão da técnica adoptada;

b) Análise das imagens e, se necessário, a utilização de filtros para remoção do ruído ou a equalização do histograma de intensidades;

c) Segmentação da região de interesse para extracção de características (contornos, orlas, linhas); e,

d) Extracção de parâmetros ou características morfométricas do tracto vocal:

- Modelos tridimensionais com base nas técnicas de reconstrução;
- Parâmetros acústico-articulatórios;
- Funções de área;
- Deformações.

Cada uma destas fases é desenvolvida e optimizada separadamente, o que torna assim estes estudos muito exigentes do ponto de vista operacional. Os avanços nas tarefas de obtenção e reconstrução da imagem e de segmentação poderão consequentemente contribuir para um maior sucesso destes estudos.

2.1. Equipamento, participantes e corpus da fala

A recolha das imagens do tracto vocal foi realizada na Unidade de Ressonância Magnética do Hospital S. João, EPE do Porto, utilizando um equipamento de RM de 3.0 Tesla (T) e o uso combinado das antenas de cabeça e pescoço, com tecnologia Phased Array, para obter uma melhor relação sinal-ruído. Antes de qualquer ensaio, obteve-se o consentimento

informado de cada sujeito, garantindo-se também a sua confidencialidade, preparação para o estudo, acompanhamento e segurança, excluindo-se eventuais contra-indicações à realização da RM.
Este estudo teve a participação voluntária de um jovem do sexo masculino, sem história prévia de patologia orofacial ou qualquer perturbação articulatória. O *corpus* da fala incluiu as cinco principais vogais orais [i ɛ a ɔ u] do Português Europeu (PE) de acordo com os símbolos do International Phonetic Alphabet (IPA). A escolha deste *corpus* da fala está relacionada com o facto destes sons serem muito fáceis de sustentar pelos sujeitos pois o tracto vocal adopta uma forma/postura fixa e estável, além de apresentarem uma duração maior que as outras classes fonéticas. Para além disso, estes cinco sons são simples e familiares a qualquer sujeito mesmo sem treino específico.

2.2. Protocolo de IRM de estudo estático 2D e 3D

Independentemente do fim a que se destina, a caracterização do tracto vocal por RM pode ser obtida através de três formas, 1) de um estudo estático (mediante a sustentação prolongada de um som), 2) de um estudo dinâmico (mediante sincronização e repetição sucessiva de um som) e, 3) de um estudo em tempo-real (através da captação directa de imagens em movimento). O primeiro permite obter essencialmente uma caracterização morfológica (posturas articulatórias) do tracto vocal, com interesse para posterior reconstrução 3D. Os estudos dinâmicos e em tempo-real demonstram essencialmente os eventos dinâmicos articulatórios, permitindo também avaliar a estabilidade do fenómeno em contexto-real.
Na Tabela 1, encontram-se resumidas as sequências e respectivos parâmetros de aquisição usados para cada um dos estudos realizados.

Aquisição	2D	3D
Plano de corte	Sagital	
Sequências de pulso	*Turbo spin eco*	*Flash* gradiente-eco
Tempo de repetição (TR)	250	6.15
Tempo de eco (TE)	9.6	2.45
Flip Angle (FA)	160º	5º
Técnica obtenção das imagens	Planos	Volume total *Slab* com 7.8 cm
Número total de cortes	1	26
Espessura de corte (mm)	3	3
FOV (mm)	240*240	240*240
Matriz	256*256	512*512
Factor de aceleração (*Syngo GRAPPA*)	4	
Tempo de aquisição (s) total por cada som	7.04	13.23
Resolução (px/mm)	1.067	2.133
Pixel size	0.937 x 0.937	0.468 x 0.468

Tabela 1. Protocolo de IRM para estudo 2D e 3D do tracto vocal.

2.3. Técnicas de análise e processamento das imagens

A modelação 3D do tracto vocal com base nas imagens recolhidas foi realizada recorrendo ao programa *ITK-SNAP*® (disponível em: http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php), de domínio público, para segmentação de estruturas 3D em imagens médicas, sendo utilizado frequentemente na análise e segmentação das imagens de tomografia computorizada e ressonância magnética. A sua utilização no estudo do tracto vocal foi também referida por outros autores [26, 27].

Dado o considerável número de imagens que se obtiveram no estudo 3D estático do tracto vocal, e de forma a minimizar o tempo dispendido e sistematizar as tarefas de segmentação realizadas para todos os conjuntos de imagens (*slabs*), os procedimentos foram os seguintes:

1) Abrir o ficheiro DICOM (*loading greyscale image*);
2) Pré-segmentação manual do tracto vocal de forma a minimizar o número de iterações;
3) Definição de uma caixa delimitativa da região de interesse de forma evitar a fuga de contornos para as estruturas adjacentes;
4) Segmentação 3D em simultâneo nos três planos ortogonais usando contornos activos (*snakes*);
5) *Volume rendering* (renderização de volume) – para mostrar o modelo 3D criado a partir da segmentação das imagens 2D.

3. RESULTADOS

Do estudo estático 2D resultaram cinco imagens sagitais, ponderadas em T1, para cada um dos sons sustentados. Para além de constituírem um referencial para as tarefas de segmentação e reconstrução 3D das imagens de aquisição volumétrica, estas imagens permitem a visualização global de todos os articuladores e da posição/postura articulatória realizada, de uma forma rápida (num tempo de aquisição muito curto) e com um menor esforço do sujeito.

As vogais são sons pronunciados com livre passagem do ar pelo tracto vocal, sem constrições, e apesar de estarem situadas nas zonas dos pontos de articulação são classificadas em classes diferentes: abertas, fechadas, médias e centrais, de acordo com a posição da língua e projecção dos lábios, e grau de abertura da boca, Figura 2.

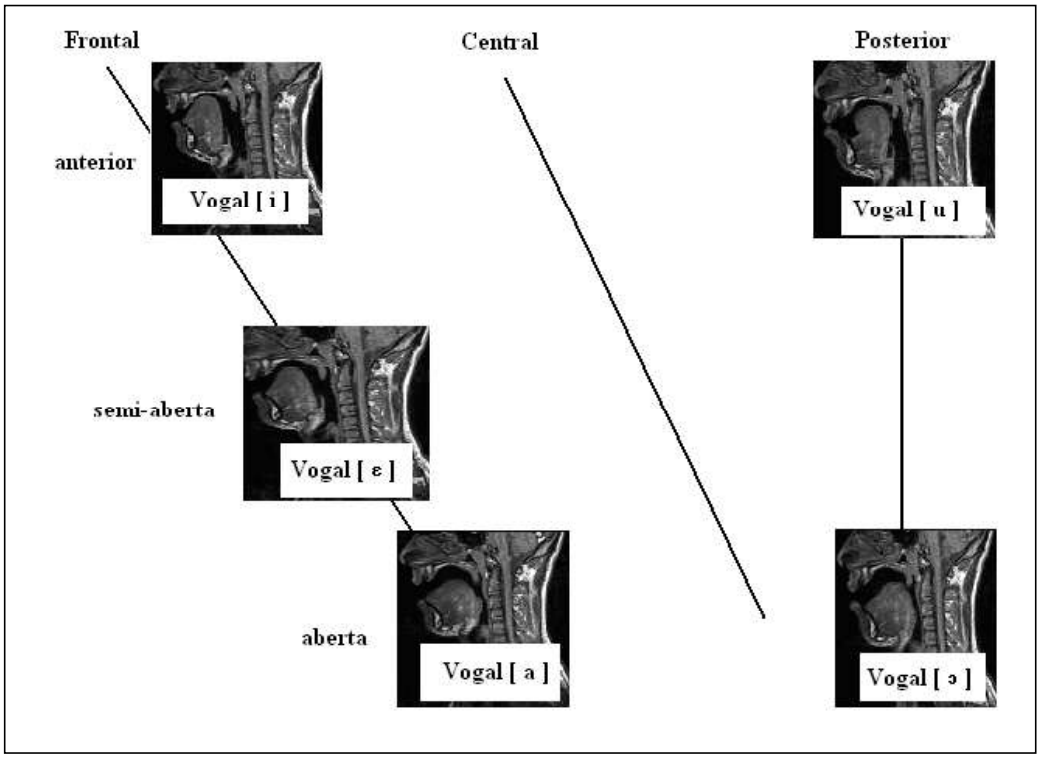

Figura 2. Correspondência de cada uma das imagens 2D de RM para cada vogal produzida e respectiva correlação com o triângulo das vogais para o PE.

Do estudo estático 3D, resultaram 26 cortes sagitais de uma "fatia"/ *slab* com 7.8 cm para cada som produzido. Através desta técnica de aquisição, é possível visualizar todo este volume em qualquer plano, proporcionando assim uma segmentação mais interactiva e dinâmica ao operador.

3.1. Caracterização morfológica 2D e 3D do tracto vocal

Os modelos 3D do tracto vocal obtidos para as cinco vogais orais do Português Europeu encontram-se ilustrados na Figura 3.

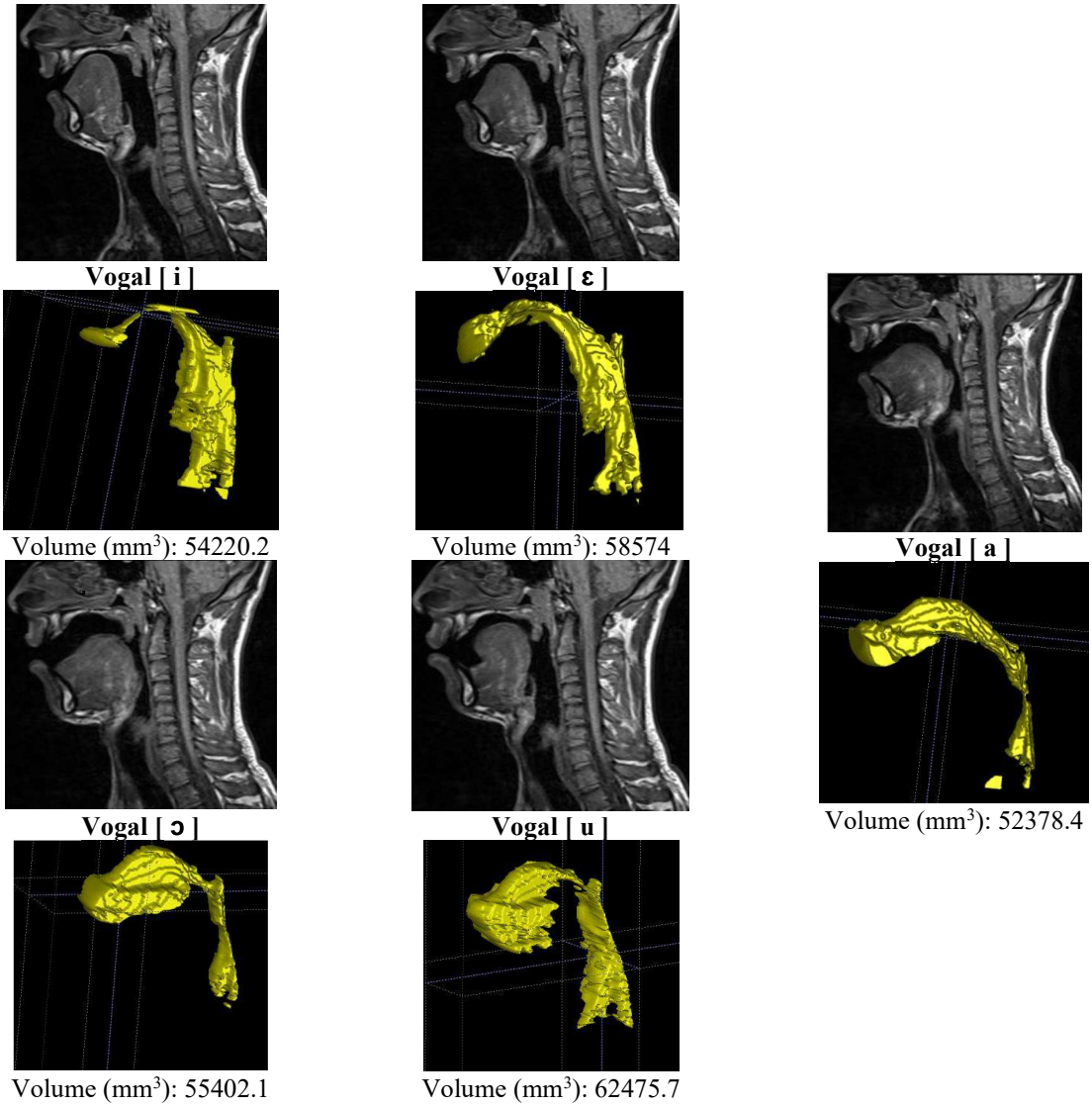

Figura 3. Modelos 3D do tracto vocal criados para as cinco vogais orais do PE e respectivos volumes.

Para além das diferentes notórias relativamente à forma/ configuração do tracto vocal na produção de cada som, as medidas volumétricas geradas são distintas, sendo o maior volume resultante para vogal [u] e o menor para a vogal [a]. Da análise dos modelos tridimensionais obtidos, observa-se também que as vogais posteriores [ɔ] e [u] apresentam maior ressonância na cavidade oral, enquanto que as vogais anteriores [i] e [ɛ] condicionam uma maior abertura da cavidade faríngea. O modelo 3D do tracto vocal na produção da vogal [a] é uniforme/contínua sem grandes modificações dimensionais das cavidades de ressonância.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nesta técnica de IRM, realizaram-se dois estudos estáticos, bi e tridimensionais, que permitiram a caracterização morfológica do tracto vocal para os principais sons vocálicos do PE, e a extracção do volume 3D resultante da sustentação destes sons.

Quanto às técnicas de IRM utilizadas, as sequências 2D de corte único ou múltiplos cortes são mais comummente usadas nos estudos de produção da fala pois permitem observar e medir a posição dos diferentes articuladores. Para além disso, servem de referência pois o tempo de aquisição é menor do que para estudos 3D. No entanto, do ponto de vista da análise computacional de imagem, as imagens 2D são menos atractivas pois a morfometria extraída representa uma estimativa da anatomia real do tracto vocal. Em contrapartida, o estudo 3D para os clínicos é de menor relevância pois é mais difícil a extracção de medidas quantitativas e referenciação espacial, ainda que permita um estudo volumétrico mais preciso do tracto vocal, por determinação do espaço articulatório, e a análise das cavidades de ressonância. A construção de modelos 3D do tracto vocal é, por isso, mais realista, permitindo a obtenção de medidas quantitativas mais rigorosas (e.g. cálculo das funções de área) ainda que os tempos de aquisição sejam mais longos.

A morfometria representa, actualmente, a tarefa mais exigente e morosa. Nesta fase, os autores procuram a sua parametrização para possibilitar a sua implementação na prática clínica auxiliando no diagnóstico e orientação clínica, para avaliação de pacientes com *deficits* articulatórios, com utilidade quer para médicos como para terapeutas da fala.

Para além disso, do ponto de vista da engenharia, estes estudos possibilitarão um acréscimo de informação, mais realista e rigorosa, permitindo a construção de modelos físicos para síntese da fala.

REFERÊNCIAS

[1] A.K. Foldvik, O. Husby, J. Kvaerness, IC. Norli e PA. Rinck, *MRI Film of Articulatory Movements*, Proceed. *1st International Conference on Spoken Language Processing* (ICSLP 90), Kobe, Japan (1990), pp. 421-42.

[2] M. Rokkaku, S. Imaizumi, S. Niimi e S. Kiritani, “Measurement of the three-dimensional shape of the vocal tract on the magnetic resonance imaging technique”, *Ann. Bull. RILP* Vol. **20**, pp. 47-54, (1986).

[3] T. Baer, J.C. Gore, S. Boyce e PW. Nye, "Application of MRI to the Analysis of Speech Production", *Magnetic Resonance Imaging* Vol. **5**, pp. 1-7, (1987).

[4] A. Nieto-Castanon e F. H. Guenther, *Constructing Speaker-Specific Articulatory Vocal Tract Models for testing Speech Motor Control Hypotheses*, Proceed. *14th International Congress of Phonetic Sciences* (ICPhS 99), San Francisco, USA (1999), pp. 2271-2274.

[5] CH. Shadle, M. Mohammad, JN. Carter e PJB. Jackson, *Multiplanar dynamic magnetic resonance imaging: new tools for speech research*, Proceed. *14th International Congress of Phonetic Sciences* (ICPhS 99), San Francisco, USA (1999), pp. 623-626.

[6] D. Demolin, T. Metens e A. Soquet, *Three-dimensional Measurement of the Vocal*

Tract by MRI, Proc. *4th International Conference on Spoken Language Processing* (ICSLP 96), Philadelphia, USA (1996), pp. 272-275.

[7] L. Apostol, P. Perrier, M. Raybaudi e C. Segebarth, *3D geometry of the vocal tract and inter-speaker variability*, Proceed. *14th International Congress of Phonetic Sciences* (ICPhS 99), San Francisco, USA (1999), pp. 443-446.

[8] O. Engwall, *Are static MRI representative of dynamic speech? Results from a comparative study using MRI, EPG and EMA*, Proceed. of *6th International Conference on Spoken Language Processing*, ICSLP-2000, Beijing, China (2000), pp. 17-20.

[9] S. R. Ventura, D. R. Freitas, I.M. Ramos e J. M. R. S. Tavares, "Utilização da Imagem por Ressonância Magnética nos Estudos sobre a Produção da Fala". *Linguística: Revista de Estudos Linguísticos da Universidade do Porto*, Centro de Linguística da Universidade do Porto Vol. **5**, No.1, pp. 175-189, (2010).

[10] S. R. Ventura, D. R. Freitas e J. M. R. S. Tavares, "Application of MRI and biomedical engineering in speech production study" *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* Vol. **12**, no. 6 pp. 671-681, (2009).

[11] K. Mády, R. Sader, A. Zimmermann, P. Hoole, A. Beer, H. Zeilhofer e Ch. Hannig, *Assessment of Consonant Articulation in Glossectomee Speech by Dynamic MRI*, *7th International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP-2002)*, Denver, USA (2002), pp. 961-964.

[12] M. Stone, E.P. Davis, A.S. Douglas, M. NessAiver, R. Gullapalli, W.S. Levine e A. Lundberg, "Modeling the motion of the internal tongue from tagged cine-MRI images." *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. **109**, No. 6, pp. 2974-2982, (2001).

[13] S. Narayanan, K. Nayak, S. Lee, A. Sethy e D. Byrd, "An Approach to Real-time Magnetic Resonance Imaging for Speech Production" *Journal Acoustical Society of America* Vol. **115**, No. 4, pp. 1771-76, (2004).

[14] S. R. Ventura, D. R. Freitas e J. M. R. S Tavares, "Toward Dynamic Magnetic Resonance Imaging of the Vocal Tract During Speech Production," *Journal of Voice,* in press, (2010).

[15] J. Benesty, M. Mohan Sondhi e Y. Huang, *Springer Handbook of Speech Processing*, Springer, Heidelberg, (2008).

[16] O. Engwall, *Assessing Magnetic Resonance Imaging Measurements - Effects of Sustenation, Gravition and Coarticulation,* Speech production: Models, Phonetic Processes and Techniques, New York, Psychology Press, (2006).

[17] T. Kitamura, H. Takemoto, K. Honda, Y. Shimada, I. Fujimoto, Y. Syakudo, S. Masaki, K. Kuroda, N. Okuuchi e M. Senda, "Difference in vocal tract shape between upright and supine postures: Observations by an open-type MRI scanner", *Acoustical Science and Technology* Vol. **26,** No. 5, pp. 465-468, (2005).

[18] M. S. Avila-García, J. N. Carter e R. I. Damper, "Extracting Tongue Shape Dynamics from Magnetic Resonance Image Sequences", *Transactions on Engineering, Computing and Technology* Vol. **2**, pp. 288-291, (2004).

[19] D. Demolin, T. Metens e A. Soquet, Real Time MRI and Articulatory Coordinations in

Vowels, Proc. *5th Speech Production Seminar*, München, Germany (2000), pp. 5-8.

[20] J. Behrends e A. Wismuller, "A Segmentation and Analysis Method for MRI Data of the Human Vocal Tract", *Forschungsberichte des Instituts fur Phonetik und Sprachliche Kommunikation der Universitat Phonetik und at Munchen (FIPKM)* Vol. **37**, pp. 179-189, (2001).

[21] E. Bresch, J. Nielsen, K. Nayak e S. Narayanan, "Synchronized and noise-robust audio recordings during realtime magnetic resonance imaging scans (L)", *Journal Acoustical Society of America* Vol. **120**, No. 4, pp. 1791-1794, (2006).

[22] M. Echternach, J. Sundberg, S. Arndt, M. Markl, M. Schumacher e B. Richter, "Vocal Tract in Female Registers - A Dynamic Real-Time MRI Study", *Journal of Voice* Vol. **24**, No. 2, pp. 133-139, (2010).

[23] M. Nessaiver, M. Stone, V. Parthasarathy, Y. Kahana, A. Kots e A. Paritsky, "Recording high quality speech during tagged Cine MRI studies using a fiber optic microphone", *Journal of Magnetic Resonance Imaging* Vol. **23**, pp. 92-97, (2006).

[24] H. Takemoto, T. Kitamura, H. Nishimoto e K. Honda, "A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions", *Acoustical Science and Technology* Vol. **25**, No. 6, pp. 468-474, (2004).

[25] I. W. Ng, T. Ono, M. S. Inoue-Arai, E. Honda, T. Kurabayashi e K. Moriyama, "Application of MRI movie for observation of articulatory movement during a fricative /s/ and a plosive /t/", *The Angle Orthodontist* Vol. **81**, No. 2, pp. 237-244, (2011).

[26] P. Martins, I. Carbone, A. Pinto, A. Silva e A. Teixeira, "European Portuguese MRI based speech production studies", *Speech Communication* **50**, No. 11-12, pp. 925–95, (2008).

[27] S. Fuchs, R. Winkler e P. Perrier, *Do Speakers' Vocal Tract Geometries Shape their Articulatory Vowel Space?*, In *8th International Seminar on Speech Production (ISSP)*, Strasbourg, France (2008), pp. 333-336.