

RAYNNIE PEREIRA DA COSTA

**COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE
DISTRIBUIÇÃO DA VENTILAÇÃO
PULMONAR ENTRE TOMOGRAFIA
COMPUTADORIZADA E TOMOGRAFIA POR
IMPEDÂNCIA ELÉTRICA**

São Bernardo do Campo – Brasil

2022

RAYNNIE PEREIRA DA COSTA

**COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE
DISTRIBUIÇÃO DA VENTILAÇÃO PULMONAR ENTRE
TOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA E TOMOGRÁFIA
POR IMPEDÂNCIA ELÉTRICA**

Relatório Final referente ao projeto de pesquisa apresentado para o Edital de Iniciação Científica N° 01/2021.

Universidade Federal do ABC – UFABC

Engenharia Biomédica

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Orientador: Prof.º Dr. Erick Dario León Bueno De Camargo

São Bernardo do Campo – Brasil

2022

Sumário

	Resumo	3
1	Introdução	4
2	Objetivos	7
2.1	Objetivos gerais	7
2.2	Objetivos específicos	7
3	Metodologia	8
3.1	Etapas para imagens de TC	8
3.1.1	Segmentação das imagens	8
3.1.2	Identificação da faixa de análise	8
3.1.3	Cálculo da distribuição de ventilação	9
3.1.4	Obtenção dos percentuais de APRL em TC	9
3.2	Etapas para imagens de TIE	9
3.2.1	Cálculo da distribuição de ventilação com e sem atlas anatômico	9
3.2.2	Obtenção dos percentuais de APRL em TIE	9
3.3	Comparação entre TC/TIE	10
4	Resultados e Discussão	11
5	Conclusão	14
	Referências	15
	Apêndices	16
	APÊNDICE A – Gráficos de Bland-Altman	17

Resumo

A TIE, Tomografia por Impedância Elétrica, é uma tecnologia de diagnóstico por imagem com diversas aplicações, uma delas sendo no diagnóstico e acompanhamento de pacientes à beira-leito que possuem doenças e síndromes que acometem o pulmão, indicando aos profissionais da saúde as áreas que mais sofrem com a falta de ventilação. Baseado na proporcionalidade linear entre a variação da resistividade e a variação de volume de ar, este trabalho tem como objetivo obter o volume de ar relativo do pulmão dividido em regiões anterior (A), posterior (P), lateral direita (R) e lateral esquerda (L) estimado a partir de imagens de TIE com e sem o uso de um atlas anatômico e compará-los com a ventilação distribuída estimada em imagens de tomografia computadorizada (TC) para as mesmas áreas. O atlas anatômico, usado como método de regularização da TIE, é uma função obtida através de amostras estatísticas anatômicas e fisiológicas e que ditam as probabilidades de distribuição de resistividades dos tecidos do tórax. A comparação entre os métodos foi mensurada por meio do teste Bland-Altman. Os resultados mostram que existe uma concordância entre a TC e a TIE com o uso do atlas anatômico, diminuindo o intervalo de confiança entre as técnicas para a divisão RL, enquanto para a divisão AP sugere-se que deve ser investigado um melhor método para a avaliação da distribuição de ar nessa direção.

1 Introdução

Segundo o *Forum of International Respiratory Societies*, doenças respiratórias são as principais causas de morte e debilitação, sendo que aproximadamente 65 milhões de pessoas sofrem de doença pulmonar obstrutiva crônica, que pode ser diagnosticada clinicamente pelo exame de espirometria (FORUM... , 2017). No entanto, esse exame não é capaz detectar danos no início da doença, tornando o tratamento mais complexo pelo diagnóstico tardio (SIMON et al., 2012).

Uma das opções de tecnologia de imagem mais avançadas que podem auxiliar na promoção de mais informações acerca da doença pulmonar é a tomografia computadorizada, TC, que permite analisar anatomicamente o pulmão, identificando áreas com deficiência em ventilação.

A tomografia computadorizada utiliza uma matriz quadrada de elementos de imagem, o pixel (GATTINONI et al., 2005). Cada *pixel* possui certo comprimento e largura, e ao adicionar a espessura do corte da imagem temos como representação o *voxel*, que representa uma região tridimensional do tecido.

A TC mede o coeficiente linear de atenuação do tecido, expresso por números de TC, ou unidades Hounsfield (*HU*). Essa unidade é obtida, em qualquer *voxel*, pela determinação da porcentagem de radiação absorvida por aquele volume de tecido. A escala de atenuação atribui arbitrariamente ao osso um valor de $+1.000HU$ (absorção completa), ao ar um valor de $-1.000HU$ (sem absorção) e à água um valor de $0HU$ (GATTINONI et al., 2001). Com isso, forma-se uma escala que relaciona esses coeficientes com as densidades, constituindo um grande espectro de tonalidades entre: branco, cinza e preto. Esta escala varia do maior valor sendo representado pelo branco até o menor valor sendo representado pelo preto e os valores intermediários em escalas cinzas, tal como ilustrado na Figura 1.

Contudo, é perceptível que o procedimento expõe o paciente a radiação ionizante e não deve ser realizado com muita frequência. Sendo assim, tecnologias menos invasivas são opções mais viáveis.

A tomografia por impedância elétrica (TIE) é uma tecnologia de imagem médica não-invasiva considerada clinicamente relevante para monitoramento da ventilação de pacientes em ventilação mecânica (FRERICHS et al., 2017).

Durante a respiração, o pulmão é influenciado pela pressão do fluxo de ar nas vias aéreas, pela elasticidade do tecido pulmonar e pelos efeitos da tensão superficial do surfactante no interior dos alvéolos (MARTINS et al., 2019), fatores esses que interferem na resistência do tecido pulmonar. Logo, quanto maior o volume de ar nos pulmões, menor é a

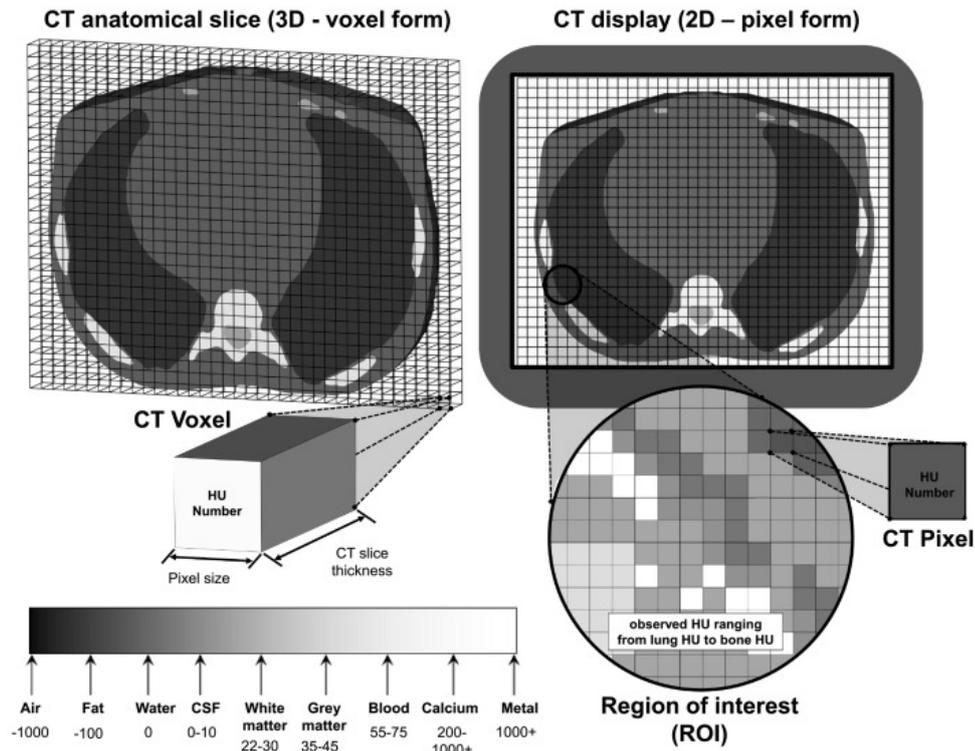


Figura 1 – Esquema representando à direita um corte de TC com pixels (2D), à esquerda com *voxels* (3D) e o espectro em *HU*. (TINO et al., 2021).

condutividade, quão maior o volume de sangue e fluido maior a condutividade (FRERICHS et al., 2017).

Na literatura, encontrou-se boa correlação entre as variações de impedância (Δz) e volume (Δv), utilizando a razão entre a variação da impedância corrente e o volume corrente pulmonar, isto é, as variações que ocorrem durante uma respiração normal, ou seja, a quantidade de ar que entra e sai do pulmão durante um ciclo ventilatório. Porém, não é possível afirmar uma relação linear entre as variáveis quando obtidas resistividades em um único nível do tórax. No entanto, essa circunstância pode ser usada para monitorar a distribuição regional da ventilação, tal como reportado em estudos que compararam imagens de TIE com TC e mostraram forte correlação nas mudanças de volume regionais pulmonares (BIKKER et al., 2009).

A TIE não oferece riscos de radiação ao paciente pois se baseia na aplicação de correntes de baixa amplitude em eletrodos posicionados em torno do tórax e na mensuração da impedância resultante. Após as medidas serem obtidas, estas são incorporadas a algoritmos matemáticos de reconstrução de imagem que geram uma estimativa de distribuição das resistividades (AYA et al., 2006), e por fim, geram uma imagem bidimensional ou tridimensional, dependendo do posicionamento dos eletrodos no corpo.

O problema matemático envolvido na obtenção das imagens de TIE é mal posto, de modo que sua resolução envolve o uso de regularizações. Um método de regularização

do problema inverso da TIE é a obtenção de imagens reconstruídas com o uso de um atlas anatômico.

De acordo com [Camargo](#), o atlas anatômico é construído por meio do cálculo de uma função de densidade de probabilidade em um conjunto de medidas de resistividade do tórax ([CAMARGO, 2013](#)).

Na construção do algoritmo são usadas imagens de TC e medidas de resistividade de tecidos conhecidas. Inicialmente, é realizada a segmentação das imagens de TC. Em seguida, são geradas imagens de resistividade por meio da substituição dos valores de resistividade dos tecidos em suas respectivas regiões segmentadas. Por fim, essas imagens de resistividade são utilizadas na obtenção de um atlas anatômico, que é usado como regularização na obtenção das imagens de TIE. Espera-se com esse método uma melhora significativa na resolução espacial das imagens de impedância, possibilitando uma melhor identificação de alterações fisiológicas pulmonares.

Diante do exposto, é oportuno analisar os percentuais de ventilação pulmonar em regiões de interesse anterior/posterior (AP) e direita/esquerda (RL, do inglês *Right/Left*) dessa ferramenta clínica, obtidas pela TIE com e sem a aplicação de um atlas anatômico, em comparação com a TC, considerada padrão ouro dessa estimativa. Com a finalidade em investigar as possíveis estimativas de distribuição de ar, uma vez que as ferramentas clínicas são baseadas nas imagens estimadas de impedância, diferentes algoritmos utilizados nesta estimativa levam a diferentes imagens, podendo alterar assim o desempenho dessas ferramentas.

A comparação entre as técnicas deve ser realizada por métodos estatísticos, tal como o teste de Bland Altman. O gráfico resultante dessa ferramenta é um gráfico de dispersão XY, no qual o eixo Y mostra a diferença entre as duas medidas emparelhadas (A-B) e o eixo X representa a média dessas medidas $((A+B)/2)$. Ou seja, a diferença das duas medições emparelhadas é plotada contra a média das duas medições.

Neste método, os limites de concordância são calculados como a média das diferenças entre duas medições $\pm 1,96$ vezes seu desvio padrão. Essa faixa corresponde ao intervalo de confiança de 95%. Cada ponto no gráfico representa um par de medidas de um determinado paciente estudado. Quanto menor o viés entre os dados, mais próximo de zero é a média da diferença, e quanto melhor a concordância, menor é o intervalo de confiança. Isto é, quanto menor o intervalo de confiança entre as comparações, melhor será a concordância entre as técnicas.

2 Objetivos

2.1 Objetivos gerais

O objetivo do projeto é a comparação entre as estimativas de distribuição de ar pela análise dos percentuais de ventilação pulmonar em regiões de interesse anterior/posterior (AP) e direita/esquerda (RL), obtidas por duas técnicas distintas: tomografia computadorizada por raio-X e tomografia por impedância elétrica.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto de pesquisa são:

- Revisão Bibliográfica;
- Obter os percentuais (APRL) de volume de ar pulmonar a partir de imagens de tomografia computadorizada;
- Obter os percentuais (APRL) de volume de ar pulmonar a partir tomografia por impedância elétrica sem o atlas anatômico;
- Obter os percentuais (APRL) de volume de ar pulmonar a partir tomografia por impedância elétrica com o atlas anatômico;
- Comparar as estimativas obtidas por meio de gráficos Bland-Altman.

3 Metodologia

Os dados utilizados nesta análise foram aprovados pelo Comitê de Ética da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Certificado de Apresentação e Apreciação Ética número 57946516.0.0000.5537).

O estudo ocorreu com uma população de 32 voluntários adultos saudáveis que se voluntariam para a pesquisa e foram submetidos ao exame de TC e TIE concomitantemente, sendo a coleta das imagens realizada por 20 segundos durante uma pausa expiratória e durante uma pausa inspiratória para simular aquisições durante uma ventilação mecânica.

As imagens pulmonares de TIE foram adquiridas utilizando o equipamento (ENLIGHT 1800®, Timpel S.A, São Paulo, Brasil) com uma cinta de 32 eletrodos, enquanto para as imagens de TC utilizou-se um scanner de 128 detectores (Aquilion CXL®, Toshiba, Japão).

3.1 Etapas para imagens de TC

3.1.1 Segmentação das imagens

A segmentação das região aerada pulmonar utilizou um algoritmo semi-automático de limiarização, com a escolha do limiar sendo feita manualmente, em seguida realizando o método mais simples de segmentação conhecido como "Region Growing" aplicando operações morfológicas de erosão e dilatação para eliminação dos artefatos presentes nas imagens.

3.1.2 Identificação da faixa de análise

Utilizamos imagens médias para realizar as análises de volume de ar. Para isso é necessário a identificar do corte central das faixas de eletrodos nas imagens, sendo o processo a identificação do primeiro e do último corte onde aparecem eletrodos, e tomando-se o corte médio entre esses dois.

Com o corte central definido, gera-se imagens médias a partir do intervalo de espessura que será analisado. O número de cortes na faixa de interesse são definidos através da divisão da espessura desejada pela espessura dos cortes, assim se utiliza essa quantidade de cortes acima e abaixo do corte central para compor a imagem média.

Definiu-se as faixas de interesse de análise para essas imagens em 20, 15 e 10 *cm* de espessura

3.1.3 Cálculo da distribuição de ventilação

De acordo com [Gattinoni et al. \(GATTINONI et al., 1987\)](#), as unidades de HU são equivalentes a densidade do pulmão. Com isso, a partir do valor médio de intensidade de todo o pulmão (ou de uma região) I_{mean} , e do volume dos *voxels* dessa região, V_{vox} , pode-se estimar o volume de ar, V_{air} , a partir da seguinte relação:

$$V_{air} = V_{vox} \left(\frac{-I_{mean}}{1000} \right) \quad (3.1)$$

Esse cálculo é aplicado nas imagens médias de TC para obtenção da distribuição de ventilação.

3.1.4 Obtenção dos percentuais de APRL em TC

Para cálculo dos percentuais de distribuição de ventilação é necessário dividir as imagens em quadrantes anterior-posterior e direita-esquerda. Primeiramente, é preciso obter coordenadas para delimitar as áreas APRL.

Após isso, o cálculo envolvido é realizado através da equação da reta, no qual com o resultado dos coeficientes lineares obtém-se os cursores necessários para a divisão da imagem em quatro quadrantes. Essa operação é necessária pois nem sempre o paciente está posicionado alinhado exatamente com a cama do equipamento de TC. Logo em seguida, com as retas criadas, as imagens serão seccionadas, de modo que se possa calcular o volume das áreas separadamente e obter a relação deles com o volume total do pulmão.

3.2 Etapas para imagens de TIE

3.2.1 Cálculo da distribuição de ventilação com e sem atlas anatômico

Uma vez que existe uma relação aproximadamente linear entre as variações de impedância (imagens de TIE) e o volume de ar nos pulmões, a distribuição de ar estimada pela TIE pode ser obtida diretamente pela relação entre a somatória dos valores dos respectivos *pixels* na região a ser analisada e a somatória de todos os *pixels* da imagem. Desse modo, é possível obter os percentuais APRL da ventilação estimados pelas imagens de TIE obtendo-se diretamente esses percentuais das próprias imagens.

3.2.2 Obtenção dos percentuais de APRL em TIE

De forma similar ao descrito no subitem [3.1.4](#) é preciso encontrar os cursores que fazem a divisão em quadrantes anterior-posterior e direita-esquerda na imagem. O método nesse caso foi obter os pontos de modo que a média do erro da diferença entre TIE e TC seja nula.

3.3 Comparação entre TC/TIE

A comparação entre as técnicas deu-se por meio da construção de gráficos estatísticos de Bland-Altman. Esses gráficos de dispersão são utilizados para analisar a concordância entre dois métodos, ou seja, se as medidas são equivalentes ao ponto de uma metodologia ser capaz de substituir a outra. No caso do presente estudo, verificaremos como essa concordância entre os valores de distribuição de ventilação entre TC e TIE varia ao se utilizar imagens estimadas com e sem o atlas anatômico.

4 Resultados e Discussão

Mediante a população de 32 voluntários, foram obtidas 32 imagens durante a inspiração e mais 32 durante a expiração, totalizando 64 imagens. Devido as faixas de interesse de análise escolhidas terem sido de 20, 15 e 10cm, foram obtidos no final 192 imagens médias. Todas as imagens adquiridas passaram pelo processo de segmentação, tal qual a Figura 2.

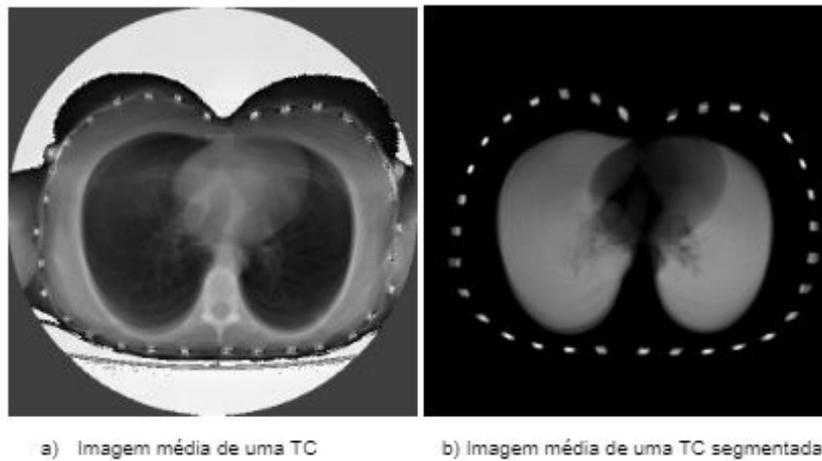


Figura 2 – Imagens Médias de TC's em uma faixa de 20cm

Aplicando o cálculo de volume de ar nas imagens segmentadas adquirimos os valores da volumetria desejada, durante a inspiração e expiração de cada corte. Assim, foi possível adquirir uma imagem média de volume de ar tanto na inspiração quanto na expiração e ao realizar a subtração de ambas obtemos a imagem de volume corrente (V_t , do inglês *tidal volume*). O V_t refere-se ao volume de ar obtido durante uma respiração normal, ou seja, a quantidade de ar que entra e sai do pulmão durante um ciclo ventilatório, como mostra a Figura 3.

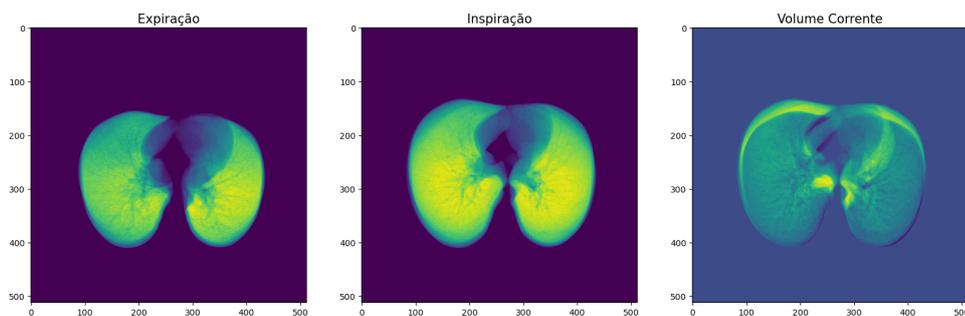


Figura 3 – Imagens de TC referentes ao volume de ar de um ciclo ventilatório

Após obter o volume de ar total do pulmão, as imagens foram seccionadas em quatro quadrantes para obtenção dos percentuais de cada região. No caso das imagens de TC, foi realizada essa divisão por meio de filtros, representados na Figura 4, que anulam parte da imagem e mantêm somente a área de interesse, de modo que se possa calcular o volume das áreas anterior, posterior, lateral esquerda e lateral direita separadamente e obter a relação deles com o volume total. Já para as imagens de TIE a divisão ocorreu de modo que a média da diferença entre TC e TIE seja nula, o que ocorreu quando foram consideradas a divisão RL em 15,35/32 e a divisão AP em 17,399/32.

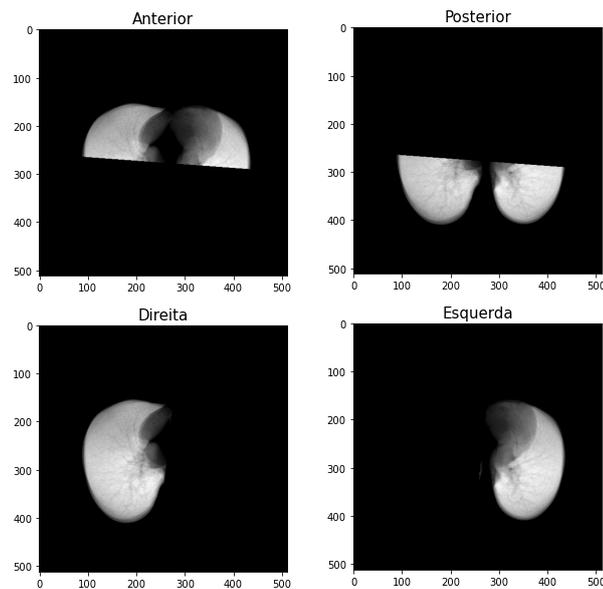


Figura 4 – Filtros APRL

No Apêndice A, os gráficos da Figura 5, se referem as medidas de distribuição de ventilação para TIE sem atlas contra os dados gerados pelo algoritmo no qual utilizamos o cálculo de volume para TC explicado na 3.1.3. Enquanto a Figura 6 representa os gráficos de comparação entre os percentuais de APRL entre TC e TIE com o atlas nas três faixas escolhidas.

A Tabela 1 sumariza os intervalos de confiança encontrados entre TC e TIE sem atlas, e a Tabela 2 entre TC e TIE com aplicação do algoritmo de atlas anatômico.

Faixa (cm)	1,96s para RL	1,96s para AP)
20	12,12%	23,38%
15	17,04%	24,77%
10	22,47%	25,21%

Tabela 1 – Intervalos de confiança para diferentes faixas, considerando imagens de TIE sem atlas anatômico

As faixas observadas entre TC e TIE sem atlas alteram significativamente o intervalo de confiança para RL, enquanto que o intervalo de confiança para AP é pouco alterado.

Faixa (cm)	1,96s para RL	1,96s para AP)
20	9,02%	28,12%
15	14,31%	25,28%
10	20,20%	23,12%

Tabela 2 – Intervalos de confiança para diferentes faixas, considerando imagens de TIE com atlas anatômico

Quando comparamos os dados entre as tabelas, é perceptível que o uso do atlas anatômico melhorou significativamente o intervalo de confiança RL, e teve pouco efeito no intervalo de confiança AP.

5 Conclusão

Baseado na proporcionalidade linear entre a variação da resistividade e a variação de volume de ar, este trabalho teve como objetivo obter a distribuição do volume de ar do pulmão dividido em regiões anterior (A), posterior(P), lateral direita (R) e lateral esquerda (L) calculados a partir de dados obtidos de 32 voluntários adultos saudáveis em exame de tomografia computadorizada (TC) e compará-los com a ventilação distribuída estimada de dados da TIE para as mesmas áreas com e sem o uso de um atlas anatômico. A comparação entre os métodos foi mensurada por meio do teste Bland-Altman. Os resultados mostram que existe uma boa concordância entre TC e TIE com o uso do atlas anatômico, melhorando significativamente o intervalo de confiança observado entre as técnicas para a divisão RL, sem alterar este intervalo para a divisão AP. A diferença observada entre as separações AP e RL, para todos os casos, tanto com quanto sem atlas, sugere que deve ser investigado um melhor método para a obtenção das regiões AP.

Referências

- AYA, J. C. et al. Regularizations for a black box eit algorithm. 2006. Citado na página 5.
- BIKKER, I. G. et al. Lung volume calculated from electrical impedance tomography in icu patients at different peep levels. *Intensive care medicine*, Springer, v. 35, n. 8, p. 1362–1367, 2009. Citado na página 5.
- CAMARGO, E. D. L. B. d. *Desenvolvimento de algoritmo de imagens absolutas de tomografia por impedância elétrica para uso clínico*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 6.
- FORUM of International Respiratory Societies. The Global Impact of Respiratory Disease. 2017. Disponível em: <https://www.who.int/gard/publications/The_Global_Impact_of_Respiratory_Disease.pdf>. Citado na página 4.
- FRERICHS, I. et al. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the translational eit development study group. *Thorax*, BMJ Publishing Group Ltd, v. 72, n. 1, p. 83–93, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- GATTINONI, L. et al. What has computed tomography taught us about the acute respiratory distress syndrome? *American journal of respiratory and critical care medicine*, American Thoracic Society New York, NY, v. 164, n. 9, p. 1701–1711, 2001. Citado na página 4.
- GATTINONI, L. et al. Pulmonary computed tomography and adult respiratory distress syndrome. *Swiss medical weekly*, EMH Media, v. 135, n. 1112, 2005. Citado na página 4.
- GATTINONI, L. et al. Pressure-volume curve of total respiratory system in acute respiratory failure: computed tomographic scan study. *American Review of Respiratory Disease*, American Lung Association, v. 136, n. 3, p. 730–736, 1987. Citado na página 9.
- MARTINS, T. de C. et al. A review of electrical impedance tomography in lung applications: Theory and algorithms for absolute images. *Annual reviews in control*, Elsevier, v. 48, p. 442–471, 2019. Citado na página 4.
- SIMON, B. A. et al. What can computed tomography and magnetic resonance imaging tell us about ventilation? *Journal of Applied Physiology*, American Physiological Society Bethesda, MD, v. 113, n. 4, p. 647–657, 2012. Citado na página 4.
- TINO, R. et al. The interlace deposition method of bone equivalent material extrusion 3d printing for imaging in radiotherapy. *Materials & Design*, Elsevier, v. 199, p. 109439, 2021. Citado na página 5.

Apêndices

APÊNDICE A – Gráficos de Bland-Altman

A seguir, os gráficos de Bland-Altman onde retirou-se os intervalos de confiança utilizados para a análise dos percentuais de distribuição regional da ventilação pulmonar entre a tomografia computadorizada (CT, (do inglês, *Computed tomography*) e a tomografia por impedância elétrica (TIE) com e sem a utilização do algoritmo de atlas anatômico. As faixas de interesse das imagens analisadas foram de 20, 15 e 10cm de espessura.

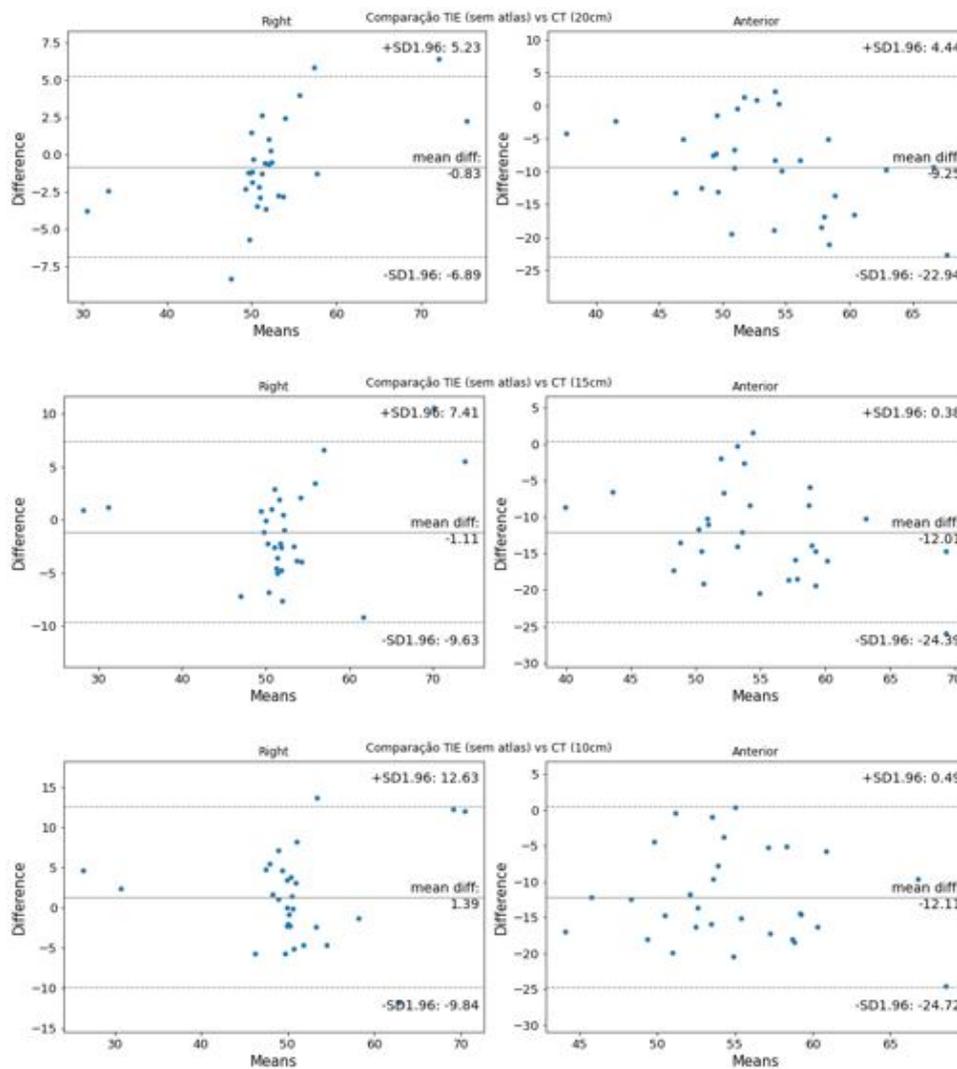


Figura 5 – Comparação TIE (sem atlas) versus CT

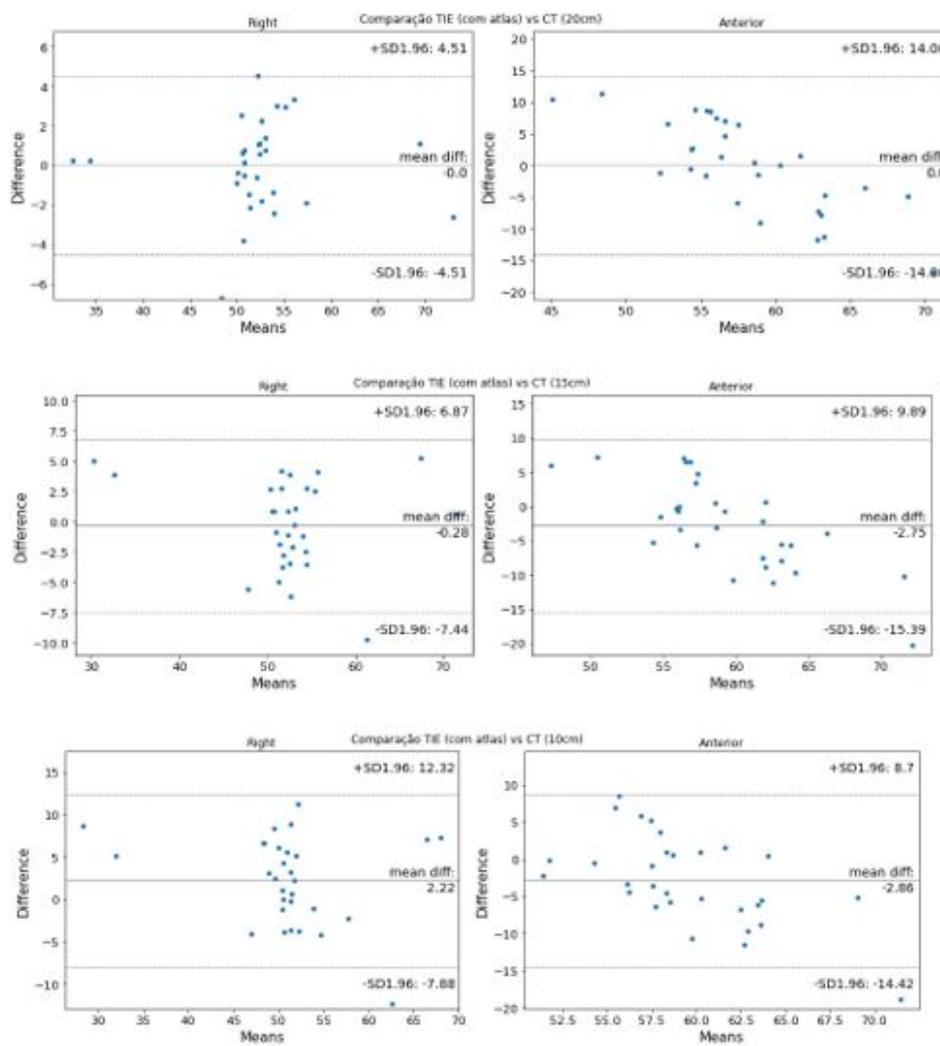


Figura 6 – Comparação TIE (com atlas) versus CT