

# PRINCÍPIOS FÍSICOS DOPPLER

## DOPPLER PHYSICAL PRINCIPLES

ANTÔNIO GADELHA DA COSTA<sup>1</sup> & PATRÍCIA SPARA GADELHA<sup>1</sup>

### RESUMO

A metodologia Doppler teve início com os trabalhos do professor austríaco Christian Andreas Doppler, em 1842, que estudou o desvio de frequência da luz emitida pelas estrelas. O primeiro uso dessa metodologia na área médica foi feita por Shigeo Satomura, em 1955, quando desenvolveu o primeiro equipamento de ultrassom Doppler com o propósito de estudo dos movimentos cardíacos. A partir de então, esse método tem sido aperfeiçoado e ganhado notoriedade no meio médico com o desenvolvimento de equipamentos com usos específicos como o Doppler de ondas contínuas, Doppler de onda pulsátil, Color Doppler e Power Doppler. Os princípios físicos dessa metodologia baseiam-se na alteração da frequência das ondas sonoras refletidas, quando o objeto refletor se move em relação a uma fonte de onda sonora. Conhecimentos como ângulo de insonação, frequência de repetição de pulso (FRP), volume da amostra e filtro de parede devem ser considerados para utilização correta da dopplervelocimetria. Os autores fazem revisão sobre o histórico e princípios físicos Doppler, enfatizando os pontos mais importantes para o uso correto da dopplervelocimetria no diagnóstico por imagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** histórico, metodologia Doppler, princípios físicos, ultrassonografia, dopplervelocimetria.

### ABSTRACT

Doppler methodology has begun with the Austrian teacher's work Christian Andreas Doppler, in 1842, when he studied the deviation of frequency of the light emitted by stars. The first use of Doppler methodology in the medical area was made by Shigeo Satomura, in 1955, when he developed the first ultrasound equipment Doppler with the purpose of studying the heart's movements. Since then, Doppler method has been improved and won fame in the medical middle with the development of equipments with specific uses like continuous wave Doppler, pulse wave Doppler, Color Doppler and Power Doppler. The physical principles of the Doppler methodology bases on the alteration of the frequency of reflected sound waves when the object reflector moves in relation to a sound wave source. The knowledge about the angle of insonation, pulse repetition frequency (PRF), volume of the sample and wall filter should be considered for a correct use of the Doppler velocimetry. The authors make revision about the historical and physical principles of Doppler, emphasizing on the most important points for the correct use of the Doppler velocimetry in the image diagnosis.

**KEY-WORDS:** historical, doppler methodology, physical principles, ultrasound, doppler velocimetry.

### INTRODUÇÃO

A primeira descrição do efeito Doppler foi em 1842 pelo professor austríaco de matemática e geometria, Christian Andreas Doppler<sup>1</sup>. Em 25 de Maio de 1842, Doppler, aos 38 anos de idade, apresentou o artigo “Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels” (A propósito da cor da luz das estrelas gêmeas e alguns outros corpos celestes)<sup>2</sup>.

Doppler aplicou seu princípio, primeiro, à astronomia. O artigo por ele apresentado, pela primeira vez, relacionou a frequência de uma fonte de acordo com a velocidade relativa a um observador. Ele teorizou que, do mesmo modo que o efeito sonoro de uma fonte em movimento varia para um observador estacionário, a cor da luz das estrelas deveria se alterar de acordo com a velocidade

relativa da estrela em relação à Terra. Além disso, declarou que todas as estrelas emitiam luz branca e que a cor de algumas das estrelas era devido ao movimento de aproximação ou afastamento da Terra<sup>2</sup>.

Infelizmente, Doppler cometeu erros ao assumir que todas as estrelas emitiam luz branca. Mais tarde, declarou que, estrelas azuis deveriam estar se movendo em direção ao observador e estrelas vermelhas deveriam se mover, afastando-se. Entretanto, foi mostrado pela teoria quântica, já no final do século XIX, que o pico de energia do espectro emitida por corpos negros é determinado pela temperatura da fonte. Por essa razão, estrelas com altas temperaturas demonstram-se azuis e, as de baixa temperatura apresentavam-se vermelhas<sup>3</sup>. Mas o princípio estava correto: um aparente desvio na frequência das ondas recebidas por um

1. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.  
SPECTRO IMAGEM - CLÍNICA DE ULTRASSONOGRAFIA E DIAGNÓSTICO POR IMAGEM DE CAMPINA GRANDE

CORRESPONDÊNCIA:  
ANTONIO GADELHA DA COSTA  
RUA DUQUE DE CAXIAS, 523, SALA 505 - PRATA  
CENTRO MÉDICO SAN RAPHAEL  
CAMPINA GRANDE - PB CEP: 58400506

observador depende do movimento relativo entre o observador e a fonte de ondas<sup>2</sup>.

Quando descreveu este fenômeno, Doppler não considerou pesquisas pré-existentes sobre transmissão da luz e sobre espectro. Herschel (1800) já havia descoberto a radiação infravermelha, e Ritter (1801) já descrevera a radiação ultravioleta<sup>4</sup>.

Em junho de 1845, um meteorologista alemão de Utrecht, Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot confirmou o princípio de Doppler, em uma ferrovia entre Utrecht e Amsterdã. Ele utilizou uma locomotiva que, na época, alcançava a incrível velocidade de 40 mph, para empurrar um vagão aberto no qual havia músicos. Ballot observou a mudança das notas musicais tocadas pelos músicos de acordo com a aproximação e o distanciamento do vagão que os continha<sup>2</sup>.

O estudo que propunha refutar a teoria de Doppler terminou por confirmá-la. Buys Ballot provou não só a existência do efeito Doppler, mas a sua dependência do ângulo de incidência da onda<sup>4</sup>.

As primeiras aplicações médicas do efeito Doppler iniciaram-se durante os anos 1950. Desde então, grandes inovações tecnológicas têm sido desenvolvidas. Shigeo Satomura (1955), no Institute of Scientific and Industrial Research, da Universidade de Osaka, no Japão, desenvolveu o primeiro dispositivo de ultrassom Doppler com propósito de diagnóstico médico e de registro dos vários movimentos das válvulas cardíacas<sup>5</sup>.

Uma significativa quantia de trabalhos pioneiros ocorreu na universidade de Washington, Seattle – EUA. Representantes eminentes desse grupo incluíam Robert Rushmer, físico, e Dean Franklin, engenheiro. Eles iniciaram o desenvolvimento de um protótipo, que consistia de dispositivo Doppler de onda contínua, em 1959, e notificaram o acesso ao fluxo sanguíneo utilizando o ultrassom com desvio de frequência Doppler<sup>6</sup>.

Satomura uniu-se a Kaneko (1959), quando, utilizando um reógráfico vascular ultra-sônico, conseguiram medir o fluxo das artérias cerebrais antes da sua penetração no crânio<sup>7</sup>.

Em 1964, Callagan et al<sup>8</sup> aplicaram o princípio Doppler para a investigação do fluxo sanguíneo fetal e deram subsídios para que se pudesse estudar a circulação fetal em detalhes. Strandness et al (1967)<sup>9</sup> da Universidade de Washington, utilizaram o ultrassom de ondas contínuas para estudar o fluxo sanguíneo em vasos periféricos. O francês Pourcelot contribuiu muito com o trabalho sobre fluxo sanguíneo, nos anos 1960. Ele e seus colegas se envolveram com o desenvolvimento do primeiro equipamento Doppler para a vigilância do sistema cardiovascular de astronautas no espaço<sup>10</sup>.

O primeiro equipamento Doppler de onda pulsátil foi desenvolvido por grupo de pesquisadores de Seattle. Donald Baker, Denis Watking e John Reid, que começaram a trabalhar nesse projeto em 1966 e produziram um dos primeiros dispositivos de Doppler pulsátil<sup>11</sup>. Outros pioneiros do Doppler pulsátil incluem Wells, do Reino Unido<sup>12</sup> e Peroneau, da França<sup>13</sup>.

Na obstetrícia, a primeira aplicação do efeito Doppler foi realizada por McCallum et al<sup>14</sup> (1977), quando utilizaram o Doppler de onda contínua para obter velocidade de fluxo na artéria umbilical após o parto. No mesmo ano, Fitzgerald et al<sup>15</sup> (1977) utilizaram o Doppler pulsátil para avaliar o fluxo

sanguíneo na artéria e veia umbilical intra-útero, mostrando, pela primeira vez, a característica espectral desses vasos e considerando a utilidade do novo método na pré-eclâmpsia e na restrição de crescimento intra-uterino.

O primeiro registro feito por Doppler Transcraniano foi realizado por Aaslid em 1981, sendo a metodologia desenvolvida pelo Departamento de Neurocirurgia da Universidade de Berna e, desde então, o método vem progressivamente se firmando como um valioso auxílio no diagnóstico de doenças vasculares cerebrais<sup>16</sup>.

## PRINCÍPIOS FÍSICOS

Efeito Doppler é o fenômeno observado na mudança de frequência da transmissão de onda de energia quando há movimento relativo entre a fonte de emissão da onda e o observador. Esse desvio na frequência é conhecido como frequência Doppler ou, simplesmente, desvio Doppler<sup>4</sup>.

Assim, na ultrassonografia, o efeito Doppler pode ser definido como sendo o princípio físico no qual se verifica a alteração da frequência das ondas sonoras refletidas, quando um objeto refletor se move em relação a uma fonte de onda sonora. Supondo que o transdutor do equipamento capte o movimento de um objeto analisado, deve-se esperar um deslocamento da frequência incidente sobre o objeto, promovendo aumento da resposta quando ambos se aproximam e redução quando se afastam. No âmbito médico, este efeito é usado durante o exame dos vasos sanguíneos ou de fluxos que produzam movimentos. As hemácias em movimento dentro dos vasos, ao encontrarem uma onda sonora, comportam-se como corpos refletivos<sup>17,18</sup>.

## TIPOS DE DOPPLER

Vários são os tipos de Doppler e, a seguir, descreveremos cada um deles com suas respectivas utilidades.

### DOPPLER DE ONDA CONTÍNUA

Doppler de onda contínua é aquele que o transdutor possui dois elementos piezoelétricos, um para a emissão dos feixes de ondas e outro para a recepção dos refletidos. Não há como identificar a fonte responsável pelo desvio dos feixes de ondas emitidas e não se pode determinar a distância entre o transdutor e o alvo em movimento. Assim, não é possível a obtenção de imagens do vaso. É a tecnologia original do Doppler que emite som audível, utilizado na detecção do batimento cardíaco fetal<sup>19</sup>.

Uma sonda de onda contínua está disponível em alguns equipamentos duplex disponíveis no mercado e podem ser úteis para estudos Doppler periorbitais ou para acompanhamento da evolução de tumores. Essas sondas de ondas contínuas de alta frequência têm melhor sensibilidade que dispositivos de Doppler de pulso de baixa frequência, e o fenômeno de aliasing não ocorre<sup>20</sup>.

### DOPPLER DE ONDA PULSÁTIL

No Doppler de onda pulsátil, um simples cristal transdutor emite pulsos curtos de pacotes de energia ultra-sônica. Entre os

pulsos, o mesmo cristal age como receptor. Como a velocidade do som nos tecidos moles é constante, o intervalo de tempo entre transmissão e recepção do sinal ultra-sônico determina a distância da área alvo ao transdutor. Assim, pode-se precisar a localização da área alvo variando esse tempo de demora. Esse processo é conhecido como range gating<sup>4</sup>.

Doppler de onda pulsátil é conhecido também como Ultrassonografia Duplex. Permite obtenção do espectrograma e análise detalhada da distribuição da frequência através da análise espectral e consegue detectar alterações das velocidades, que variam de acordo com o ciclo cardíaco e a distribuição das frequências, em virtude da possibilidade da escolha do local a ser avaliado<sup>21</sup>. O ultrassom com Doppler pulsátil possibilitou a avaliação de vasos mais profundos e das câmaras cardíacas, inviável até então<sup>22</sup>.

## COLOR DOPPLER

Nos dispositivos de Color Doppler, a cor é alcançada por meio de um de dois métodos. Em um deles, o sinal primordial é dividido em dois canais, um canal em imagem em escala de cinza, para avaliar a amplitude dos ecos recebidos, e o canal Doppler, para detectar velocidade e direção do fluxo. As imagens em escala de cinza e as de fluxo são combinadas em monitor colorido<sup>20</sup>.

O implemento do transdutor único deu-se, por volta de 1980, quando a função Doppler foi incorporada ao sistema de ampla varredura. No início da década de 1980, com o advento de novos sistemas independentes de imagens de Doppler de fluxo colorido, tornou-se possível a obtenção de imagens coloridas do fluxo sanguíneo do vaso avaliado<sup>19</sup>.

A direção do fluxo em relação ao transdutor é ilustrada em uma barra colorida ao lado da imagem. Convencionou-se que o fluxo que se aproxima do transdutor é vermelho e aquele, que tem direção contrária, é azul. Fluxos de maior velocidade são expressos por tonalidades mais claras da mesma cor.

Diferenças na cor das imagens podem indicar a magnitude da velocidade. Quando se tem altas velocidades, observa-se o fenômeno aliasing, no qual se observa mosaico de cores. Este fenômeno pode ser observado, por exemplo, no ducto venoso. Turbulência, relacionada às faixas de velocidades em cada amostra de volume, pode também ser representada por mosaico de cores. Pode-se observar fluxo turbulento, por exemplo, no bulbo carotídeo<sup>23</sup>.

## POWER DOPPLER

No Power Doppler, a intensidade do sinal de cada ponto se relaciona com o número de células sanguíneas que se movem naquela amostra. O modo Power Doppler não avalia a direção do fluxo sanguíneo e, portanto, a imagem mostra pouca dependência do ângulo e não sofre o fenômeno aliasing. Apresenta menos informação acerca do fluxo sanguíneo, por não identificar a direção do mesmo. Entretanto, é mais sensível e pode ser utilizado para compartimentos vasculares, nos quais as velocidades de fluxo sanguíneo são baixas, facilitando a identificação do vaso e a avaliação se o mesmo é pervio<sup>23</sup>.

## EQUAÇÃO DOPPLER

Utilizou-se a seguinte representação matemática para se an-

$$f_d = \frac{2f_o v \cos \theta}{c}$$

Onde  $f_d$  é desvio de frequência Doppler,  $f_o$  frequência incidente,  $v$  velocidade do fluxo,  $c$  velocidade do som no tecido e  $\theta$  é ângulo entre feixe de ultrassom e direção do fluxo sanguíneo

unciar o efeito Doppler:

Essa expressão implica que a frequência de um eco de ultrassom de um refletor, em movimento, difere daquela que o incidiu. O desvio de frequência Doppler,  $f_d$ , depende da velocidade do corpo refletor e da sua direção, assumindo que a frequência incidente e a velocidade do som para um dado instante<sup>20</sup>.

Então, se o sentido do fluxo sanguíneo for à direção do transdutor,  $f_d$  será positiva, isto é, o eco retornado terá uma frequência mais alta. No entanto, se a direção do fluxo sanguíneo for no sentido contrário ao do transdutor,  $f_d$  será negativa e a frequência do ultrassom refletido será mais baixa do que aquela transmitida.

A fim de se aplicar corretamente a dopplervelocimetria é necessário instrução sobre ângulo de insonação, frequência de repetição do pulso (PRF), volume de amostra e filtro de parede<sup>24</sup>

## ÂNGULO DE INSONAÇÃO

Analisando a equação Doppler ( $f_r - f_o = 2.f_o.v.\cos\theta/C$ ), verifica-se que o cálculo das velocidades de fluxo sanguíneo ( $v$ ) depende do ângulo de insonação ( $\theta$ ). Além disso, é sabido que ângulos acima de 60° são inadequados para avaliações dopplervelocimétricas<sup>25</sup> e, quando próximos a 90°, produzem artefatos tipo imagem em espelho, cujos registros não são adequados, principalmente para o cálculo do pico de velocidade sistólica. Por outro lado, a possibilidade de se alinhar o transdutor com o vaso, em 0°, permitiria sinal dopplervelocimétrico ideal, tendo em vista que  $\cos 0^\circ = 1$ . Verificam-se estes dados ao se analisar a equação Doppler. Entretanto, há dificuldade técnica para obter ângulo de insonação 0° entre transdutor e vaso. Assim, ângulos entre 30° e 60° são utilizados com maior frequência<sup>20</sup>.

Em 1995, Burns observou que, para o cálculo da velocidade, a insonação do feixe acústico a 45° gera margem de erro de 9%. Entretanto, quando o ângulo é ajustado para 20°, os erros não apresentam significância<sup>26</sup>.

## FREQUÊNCIA DE REPETIÇÃO DO PULSO E ALIASING

Um transdutor de Doppler pulsátil transmite ondas curtas de ultrassom geradas por um cristal piezoeletrico, em intervalos regulares. Esse cristal também recebe o sinal refletido no resto do tempo, comparando-o com aquele transmitido. A onda pulsada permite ao Doppler medir uma região específica dentro de um

campo de imagem, possibilitando assim a medida de velocidade de fluxo dentro dos vasos selecionados. Denomina-se frequência de repetição de pulso (PRF) a frequência com a qual os pulsos são emitidos, por segundo<sup>27,28</sup>.

Ao se transmitir um pulso de ultrassom a um tecido, o sistema Doppler pulsátil deve receber o último eco desse pulso antes de transmitir o próximo, de modo que a localização do eco seja determinada sem ambiguidades<sup>20</sup>.

A relação entre a repetição de pulsos e a medição apropriada do pulso de frequência é ditada pelo teorema de Shannon que estabelece que, para uma medição sem ambiguidade de um fenômeno periódico, a frequência máxima não pode exceder metade da PRF<sup>29</sup>.

A máxima frequência limiar é conhecida como frequência Nyquist ou limite Nyquist, expressa da seguinte forma matemática:  $f_{\max} = f_{\text{PRF}}/2$ . A frequência Nyquist, portanto, determina um limite na máxima velocidade de fluxo que pode ser mensurada por um instrumento Doppler, em uma PRF fixa. Essa máxima velocidade é determinada de acordo com a seguinte equação matemática:  $v_{\max} = c(\text{PRF})/4.f_0.\cos \theta$ . Desta equação, percebe-se que a máxima velocidade mensurável pode aumentar, aumentando o PRF, diminuindo a frequência incidente ( $f_0$ ) ou diminuindo o  $\cos \theta$ , que corresponde ao aumento do ângulo de insonação<sup>20</sup>.

Quando as velocidades de fluxo sanguíneo são maiores que a frequência de Nyquist ocorre o aliasing. A ocorrência de aliasing impede as medidas corretas das velocidades e índices, porque aparece como ondas espectrais partidas. Os fatores que podem evitar o aliasing são operar em frequência menor, ângulo de insonação maior, baixar a linha de base e aumentar o PRF<sup>20</sup>.

## FILTROS DE PAREDE

Os instrumentos Doppler detectam, além de movimentos do fluxo sanguíneo, ruídos de estruturas dinâmicas adjacentes aos vasos, que estão abaixo de determinado limite de frequência<sup>30</sup>. Estes sinais podem ocasionar artefato abaixo da linha de base da onda espectral. Burns (1995) relatou que os filtros de parede têm como função eliminar sinais provenientes do fluxo sanguíneo de baixa velocidade, que podem ocasionar interpretações errôneas no espectro Doppler. Porém, a utilização de filtro de parede muito alto, pode amputar o componente diastólico. Para se evitar esse fato, utiliza-se filtro de parede entre 50 e 70Hz<sup>26</sup>.

Em conclusão, sabe-se que a dopplervelocimetria é utilizada em todas as especialidades médicas. Entretanto, é necessário conhecer os princípios físicos da metodologia Doppler e empregá-los de forma correta, para que não haja erros nos resultados dos exames dopplervelocimétricos.

## REFERÊNCIAS

- Goldberg, BB. Obstetric US imaging: the past 40 years. *Radiology*. 2000;215:622-9.
- Roguin, A. Christian Johann Doppler: the man behind the effect. *Br J Radiol*. 2002;75:615-9.
- Woodcock JP. Introduction to Doppler ultrasound. In: Hennerici MG, Meairs SP, editors. *Cerebrovascular ultrasound: theory, practice and future developments*. 1st ed. Cambridge University Press; 2001. p. 3-15.
- Maulik, Dev. Doppler sonography: a brief history. In: *Doppler ultrasound in obstetrics and gynecology*. 2nd edition. Germany. Springer; 2005. p. 1-7.
- Satomura S. Study of flow patterns in peripheral arteries by ultrasonics. *J Acoust Soc Amer* 1959;29:151-8.
- Franklin DL, Schlegel W, Rushmer RF. Blood Flow measured by Doppler frequency shift of back scattered ultrasound. *Science* 1961;134:564-5.
- Peixoto, MAP; Netto, HC; Silva, LGP; Montenegro, CAB. Doppler flow velocity waveforms: an historical approach. *J bras ginecol* 1990;100:265-70.
- Callagan D, Rowland T, Goldman D. Ultrasonic Doppler observation of the fetal heart. *Obstet Gynecol* 1964;23:637-41.
- Strandness DE Jr, Schultz RD, Sumner DS, Rushmer RF. Ultrasonic flow detection. A useful technic in the evaluation of peripheral vascular disease. *Am J Surg* 1967; 113:311-20.
- Pourcelot L. Clinical applications of Doppler instruments. In: Peronneau P, editor. *Ultrasonic velocimetry. Application to blood flow studies in large vessels*. Inserm Paris 1974. p. 213-40.
- Baker DW. Pulsed ultrasonic blood flow sensing. *IEEE trans sonic ultrasonics SU*. 1970;17:170-85.
- Wells PNT. A range gating ultrasonic Doppler system. *Med Biolo Eng* 1969;7:641-652.
- Peronneau PA, Leger F. Doppler ultrasonic pulsed flowmeter. In: *proceedings of the 8th conference on medical and biological engineering*. 1969:10-11.
- McCallum, WD. Qualitative estimation of blood velocity changes in human umbilical arteries after delivery. *Early Hum. Dev* 1977;1:99-106.
- FitzGerald DE, Drumm JE. Non-invasive measurement of human fetal circulation using ultrasound: a new method. *Br Med J* 1977;2:1450-1.
- Radanovic, M, Scaff M. Uso do Doppler transcraniano para monitorização do vasoespasm cerebral secundário à hemorragia subaracnoide. *Ver Ass med Brasil*. 2001;47:59-64.
- Vermillon, R.P. Basic physical principles. In: Snider, AR, Ritter, SB, Serwer GA. *Echocardiography in pediatric heart disease*. 2.ed. Missouri. Mosby; 1997. p.1-10.
- Gadelha-Costa A, Spara-Gadelha P, Costa HA, Gadelha EB. Doppler em Obstetrícia - Aspectos Metodológicos. *Femina* 2008;36:107-10.
- Nimura Y. Introduction of the ultrasonic Doppler technique in medicine: a historical perspective. *J med ultrasound* 1998;6:5-13.
- Taylor KJ, Holland S. Doppler US. Part I. Basic Principles, Instrumentation and Pitfalls. *Radiology* 1990;174:297-307.
- Gosling RG, King DH. Arterial assessment by Doppler-shift ultrasound. *Proc R. soc med*. 1974;67:447-9.
- Griffin, Cohen-overbeekt, Campbells S. Fetal and utero-placental blood flow. *Clin obstet cynaeco*. 1983;10:565-602.
- McDicken WN, Hoskins PR. Physics principles, practice and artefacts. In: Allan PL, Dubbins PA, Pozniak MA, McDicken WN. *Clinical Doppler ultrasound*. 2nd ed. Elsevier; 2006. p. 1-26.
- Feigenbaum, H. Instrumentation. In: *Echocardiography*. 4th ed. Philadelphia. Lea and Febiger; 1986. p.1-49.
- Gill RW. Pulsed Doppler with B-mode imaging for quantitative blood flow measurement. *Ultrasound Med Biol* 1979; 5:223-35.
- Burns PN. Hemodynamics. In: Taylor KJW, Burns PN, Wells PNT, editors. *Clinical Applications of Doppler Ultrasound*. 2nd ed. New York: Raven Press; 1995. p. 35-98.

27. Szatmári V, Sótonyi P, Vörös K. Normal duplex Doppler waveforms of major abdominal blood vessels in dogs: a review. *Vet Radiol Ultrasound*. 2001;42:93-107.
28. Yanik, L. The basics of Doppler ultrasonography. *Veterinary Medicine* 2002;3:388-400.
29. Kaur L, Chauhan R.C, Saxena S.C. Joint thresholding and quantizer selection for compression of medical ultrasound images in the wavelet domain. *Journal of Medical Engineering & Technology* 2006;30:17-24.
30. Merrit CRB: Física do ultrassom. In: Rumack CM, Wilson SR, Charboneau JW, editores. *Tratado de Ultrasonografia Diagnóstica*. 3ª ed. Rio de Janeiro. Elsevier; 2006. p. 3-34.