

Calorimetria indireta

J.R.C. DIENER

Serviço de Terapia Intensiva do Hospital de Caridade de Florianópolis. Comissão de Suporte Nutricional do Hospital Universitário da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

UNITERMOS: Calorimetria indireta. Suporte nutricional. Nutrição parenteral. Metabolismo.

KEY WORDS: Calorimetry, indirect. Nutrition. Parenteral nutrition. Enteral nutrition. Metabolism.

INTRODUÇÃO

A calorimetria indireta é um método não-invasivo que determina as necessidades nutricionais e a taxa de utilização dos substratos energéticos a partir do consumo de oxigênio e da produção de gás carbônico obtidos por análise do ar inspirado e expirado pelos pulmões^{1,2}.

Introduzida no início deste século, a calorimetria indireta (CI) teve papel fundamental na investigação do metabolismo dos seres vivos^{3,4}. Na área clínica, foi amplamente utilizada até a década de 1950, para avaliar o estado funcional da glândula tireóide, mediante determinação do metabolismo basal. Com a introdução de métodos específicos de avaliação da função tireoidiana, os laboratórios de CI foram sendo progressivamente desativados nos hospitais, e esta metodologia permaneceu restrita a alguns poucos centros de pesquisa⁵⁻¹⁰.

A introdução do suporte nutricional, na década de 1970, renovou o interesse no estudo do metabolismo e nutrição dos pacientes gravemente enfermos^{11,12} e demonstrou a necessidade de se determinar, de maneira acurada, o dispêndio energético^{13,14}. Os avanços recentes ocorridos na área da eletrônica e informática permitiram o desenvolvimento de aparelhos microprocessados compactos de CI na década de 1980¹⁵⁻¹⁸. Esses monitores metabólicos tiveram ampla aceitação clínica e estão sendo cada vez mais empregados no manejo metabólico e nutricional dos pacientes hospitalizados¹⁹⁻²².

Esta revisão aborda as bases teóricas, os equipamentos disponíveis, a técnica de execução, a interpretação e as aplicações clínicas da CI.

METABOLISMO ENERGÉTICO

Os seres humanos são sistemas termodinâmicos que necessitam de energia para manter sua organização e estão em constante troca com o meio

ambiente^{23,24}. A energia para suportar os processos vitais é obtida pela oxidação dos nutrientes contidos nos alimentos ingeridos²⁵. A energia química potencial contida nas ligações C-H dos carboidratos, lipídios e proteínas é liberada por oxidação desses substratos dentro das células, numa série de passos bioquímicos que ocorrem no citosol e nas mitocôndrias, conhecidos como metabolismo intermediário²⁵. Esse processo consome oxigênio e produz água, gás carbônico, energia química armazenada nas ligações fosfato do trifosfato de adenosina (ATP) e calor que é dissipado para o meio ambiente. Aproximadamente 65% da energia liberada na oxidação do substrato é transformada em energia química armazenada no ATP e 35% da energia é liberada sob a forma de calor. O ATP é uma forma de armazenamento de energia intracelular prontamente disponível para realizar trabalho químico ou mecânico, por meio da sua hidrólise em difosfato de adenosina (ADP) com liberação da energia armazenada^{26,27}.

O dispêndio energético diário compreende o dispêndio basal, o dispêndio da atividade física e o efeito térmico dos alimentos²⁸. O dispêndio basal representa a energia despendida por um indivíduo mantido em repouso, em um ambiente termicamente neutro, pela manhã, ao acordar após 12 horas de jejum, e depende da massa corporal magra e, em menor extensão, da idade, do sexo e de fatores familiares²⁹. O dispêndio basal representa 60% a 75% do custo energético diário e inclui a energia gasta com a bomba de sódio-potássio e outros sistemas que mantêm o gradiente eletroquímico das membranas celulares, a energia empregada na síntese dos componentes do organismo, a energia necessária para o funcionamento dos sistemas cardiovascular e respiratório e a energia despendida pelos mecanismos termorregulatórios para manter a temperatura corporal^{6,30}. A condição basal não é encontrada nas situações clínicas habituais. O gasto energético despendido em repouso pelo indivíduo, em um ambiente que não é termicamente neutro e enquanto recebendo medicamentos ou tratamento suportivo incluindo o suporte nutricional, é referido como dispêndio energético de repouso. O dispêndio de repouso

costuma ser 10% maior do que o dispêndio basal^{6,31,32}. A energia despendida na digestão, transporte, transformação e armazenamento dos substratos energéticos inclui um componente de termogênese obrigatória e um componente de termogênese facultativa ou regulatória. Para uma dieta mista habitual, o efeito térmico teórico é de 5-7% do seu conteúdo energético^{33,34}. Já a energia empregada para realizar trabalho mecânico externo representa 15% a 30% do dispêndio energético diário e varia com o nível de atividade física do indivíduo^{7,10}.

As enfermidades clínicas e cirúrgicas, em geral, elevam o dispêndio energético como parte da resposta metabólica ao estresse que desencadeia nos pacientes^{35,36}. A elevação depende da gravidade da doença, da extensão da agressão sofrida pelo paciente, da presença de febre, do desenvolvimento de complicações como sepse e disfunção de múltiplos órgãos e das medidas terapêuticas adotadas. Após cirurgias eletivas, o dispêndio de repouso aumenta de 5% a 20%. Fraturas múltiplas, injúrias abdominais extensas, traumatismos do sistema nervoso central e infecções graves elevam o dispêndio energético de repouso 50% a 60% acima do previsto, enquanto que, nos grandes queimados, o dispêndio pode chegar ao dobro do previsto^{5,6,21,37}. Portadores de condições clínicas, como insuficiência cardíaca, insuficiência respiratória, pancreatite aguda, neoplasias e hemorragia subaracnóide, também apresentam dispêndio elevado^{21,38,39}. Alguns pacientes apresentam dispêndio menor do que o previsto. Esta resposta hipometabólica tem sido associada a determinações na fase inicial da injúria (*ebb phase*), presença de choque ou instabilidade hemodinâmica, falência bioenergética celular, doença hepática avançada, hipotireoidismo, desnutrição, traumatismo raquimedular, hipotermia e utilização de analgesia e sedação^{14,40-42}.

Durante a hospitalização, os cuidados médicos habituais elevam o dispêndio energético. Aumentos entre 10% e 15% são descritos durante a realização de eletrocardiograma, exame físico e outras interações de curta permanência com a equipe de saúde. Durante a realização de curativos, higiene no leito, exame radiológico no leito e fisioterapia respiratória, foram observados aumentos entre 20% e 35% do dispêndio energético de repouso. A movimentação do paciente, a presença de desconforto respiratório, dor, ansiedade e agitação aumentam o dispêndio, enquanto que analgesia e sedação o reduzem⁴³⁻⁴⁵. A influência desses fatores no dispêndio energético total diário, porém, é de 5% a 10% do dispêndio de repouso, já que durante a maior parte do período os pacientes estão imóveis, dormindo ou sedados^{43,46}.

Tabela 1 — Algumas equações propostas para calcular o dispêndio energético de repouso em pacientes gravemente enfermos

Harris-Benedict	
Homens:	$DER = 66,5 + 13,7 \times P + 5 \times A - 6,8 \times I$
Mulheres:	$DER = 655,1 + 9,7 \times P + 1,8 \times A - 4,7 \times I$
Hunter	
	$DER^* = 613 + 19,7 \times P - 525,6 \times S \text{ (masc=1; fem=2)} + 28,7 \times L$
Swinamer	
	$DER^* = 945 \times SC - 6,4 \times I + 108 \times T + 24,2 \times f + 817 \times VC - 4349$
Ireton-Jones	
	$DER^* = 1925 - 10 \times I + 5 \times P + 281 \times S \text{ (masc=1; fem=0)} + 292 \times Tr \text{ (sim=1; não=0)} + 851 \times Q$
	$DER = 629 - 11 \times I + 25 \times P - 609 \times O \text{ (sim=1; não=0)}$
Frankenfield	
	$DER^* = 1.000 + 100 \times VE + 1,3 \times HB + 300 \times Sepse \text{ (sim=1; não=0)}$
Sherman	
	$DER^* = 9,27 \times VE \times pECO_2$

DER = dispêndio energético de repouso (kcal/dia); DER* = equação para pacientes em ventilação mecânica; P = peso em kg; A = altura em cm; I = idade; S = sexo; L = leucometria em 1.000 cels/mm³; Tr = trauma; Q = % área queimada; SC = superfície corporal em m²; T = temperatura em °C; VC = volume corrente L/min; VE = volume minuto L/min; f = frequência respiratória; O = obesidade; HB = equação de Harris-Benedict (Elwyn *et al.*, 1981, Hunter *et al.*, 1988, Swinamer *et al.*, 1990, Ireton-Jones *et al.*, 1992, Frankenfield *et al.*, 1994, Sherman, 1994).

O dispêndio energético de repouso pode ser medido por CI ou estimado por equações preditivas. A equação de Harris-Benedict, que é a mais utilizada, estima o dispêndio de repouso com uma precisão de ±10% em 80% a 90% dos indivíduos normais⁶. Quando empregada em pacientes gravemente enfermos, porém, essa equação prediz corretamente o dispêndio em menos de 50% dos indivíduos. Essa variabilidade está relacionada à gravidade da doença, a modificações da composição corporal, atividade metabólica alterada e múltiplas intervenções clínicas termogênicas e termodepressivas^{38,47,48}. A recomendação de empregar fatores de correção para adequar o dispêndio calculado ao estado clínico do paciente não melhora o poder preditivo e, frequentemente, é causa de administração excessiva de calorias e nutrientes, com potenciais efeitos deletérios^{19,20,49,50}.

Reconhecendo a necessidade de estimar o dispêndio energético em instituições que não dispõem de CI, vários pesquisadores têm proposto equações específicas, desenvolvidas a partir de estudos de calorimetria em grupos de pacientes com características clínicas similares⁵¹⁻⁵⁵. Outros recomendam o emprego da equação clássica de Harris-Benedict sem fatores de correção ou empregando, no máximo, um fator de correção de 1,3 vez o valor calculado (tabela 1). Ao se empregar uma equação preditiva, é importante saber se a equação prediz o dispêndio basal, de repouso ou total, a população

Tabela 2 — Equivalentes calóricos obtidos pela oxidação dos substratos *in vivo**

Substrato	CO ₂ produzido por grama de substrato L/g	O ₂ consumido por grama de substrato L/g	QR	Calor produzido por grama de substrato kcal/g	Calor produzido por litro de O ₂ consumido kcal/L
Glicogênio	0,829	0,829	1,00	4,18	5,05
Sacarose	0,786	0,786	1,00	3,96	5,04
Glicose	0,746	0,746	1,00	3,74	5,01
Lipídio	1,427	2,019	0,70	9,46	4,69
Proteína	0,774	0,966	0,80	4,32	4,48

*Baseado em Houssay *et al.*, 1969, Livesey e Elia, 1988, Simonson e DeFronzo, 1990.

da qual a equação foi obtida e os fatores que afetam e alteram a capacidade preditiva²¹.

BASES TEÓRICAS DA CALORIMETRIA INDIRETA

A CI mede a produção de energia a partir das trocas gasosas do organismo com o meio ambiente. A denominação indireta indica que a produção de energia, diferentemente da calorimetria direta que mede a transferência de calor do organismo para o meio ambiente, é calculada a partir dos equivalentes calóricos do oxigênio consumido e do gás carbônico produzido. Admitindo-se que todo o oxigênio consumido é utilizado para oxidar os substratos energéticos e que todo o gás carbônico produzido é eliminado pela respiração, é possível calcular a quantidade total de energia produzida. Essa “produção de energia” significa a conversão da energia química armazenada nos nutrientes em energia química armazenada no ATP mais a energia dissipada como calor durante o processo de oxidação³³.

A CI é o único método prático para identificar a natureza e a quantidade dos substratos energéticos que estão sendo metabolizados pelo organismo. Sendo considerada uma teoria, ela se baseia em vários pressupostos^{1,56-58}:

1) A entrada e saída dos gases envolvidos no processo de combustão metabólica ocorre só pelo nariz e pela boca. As perdas através da pele são mínimas e são desconsideradas. Nem o oxigênio e nem o gás carbônico são armazenados no organismo.

2) Não está ocorrendo produção anaeróbica de energia.

3) O aporte de substratos energéticos consiste de proteínas, carboidratos e gorduras, todos de uma dada composição química.

4) Os substratos energéticos participam só na reação de combustão, na lipogênese e na gliconeogênese. As concentrações de produtos intermediários não se modificam, apesar de as taxas das rea-

ções poderem variar.

5) A taxa de excreção de nitrogênio na urina como uréia representa a taxa de catabolismo protéico simultâneo.

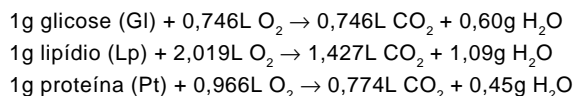
6) O organismo está em estado de equilíbrio e a duração do estudo é suficiente para corrigir flutuações nos *pools* do gás carbônico, glicose e uréia.

Conhecendo-se as taxas de produção de gás carbônico, consumo de oxigênio e excreção de nitrogênio urinário num determinado período de tempo, pode-se calcular a taxa de desaparecimento dos substratos metabólicos a partir dos seus respectivos *pools* e definir a participação percentual de cada substrato na produção de energia. O conceito de desaparecimento metabólico é primordial para a interpretação da calorimetria. Embora não seja a única, a oxidação é a principal via pela qual o substrato desaparece do seu *pool* metabólico e é a via utilizada em condições normais. Devido a isso, os termos desaparecimento e oxidação são usados indistintamente, embora sob certas condições as taxas de oxidação e desaparecimento possam diferir consideravelmente³³.

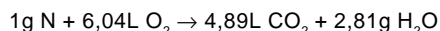
A quantidade de energia produzida, a quantidade de oxigênio consumido (VO₂) e a quantidade de gás carbônico produzido (VCO₂) por grama de substrato metabólico oxidado no organismo foram determinadas experimentalmente por Lusk e outros pesquisadores no início deste século^{28,58}. A relação entre o VCO₂ e o VO₂ é referida como quociente respiratório (QR) e pode ser empregada para conhecer o tipo de substrato que está sendo oxidado pelo indivíduo em estudo (tabela 2). O QR é dividido em quociente respiratório não-protéico (QR_{np}), que traduz a participação dos carboidratos e lipídios no VCO₂ e VO₂, e quociente respiratório protéico (QR_p), que representa a participação das proteínas. Essa diferenciação no QR é realizada determinando-se a taxa de excreção diária do nitrogênio na urina^{28,33}.

Os carboidratos e os lipídios são oxidados completamente até CO₂ e H₂O. As proteínas, além de produzir CO₂ e H₂O, liberam nitrogênio que é excretado pela urina. Uma estimativa da oxidação

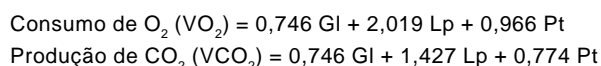
protéica pode ser obtida medindo-se a excreção do nitrogênio urinário. Considerando-se que o conteúdo nitrogenado das proteínas é 16% aproximadamente, admite-se que cada grama de nitrogênio urinário represente a oxidação de 6,25 gramas de proteína. As reações estequiométricas da oxidação dos substratos energéticos são^{1,33}:



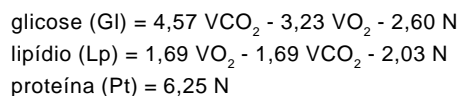
Substituindo-se proteína pelo equivalente em nitrogênio (N), obtém-se:



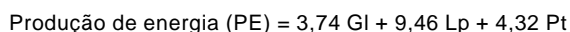
Pelas tabelas de equivalência calorimétrica, sabe-se que:



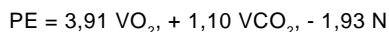
Por substituição matemática nas equações, encontra-se:



Calcula-se a produção de energia a partir dos equivalentes calóricos dos substratos³³:



Substituindo-se em função das variáveis medidas VO_2 , VCO_2 e N, obtém-se:



Quando se exclui a oxidação das proteínas no cálculo da produção de energia, o erro introduzido é aproximadamente de 2% e pode ser desprezado^{33,59}. Já o efeito de não considerar a oxidação protéica ou utilizar um valor que difere do real, ao se calcular as taxas de oxidação dos carboidratos e lipídios, é considerável e pode ser previsto pelo quociente respiratório. Quando o QR está próximo de 0,80, o QR_{np} é quase idêntico e uma estimativa precisa não é necessária para calcular as taxas de oxidação dos carboidratos e lipídios. Porém, quando o QR se afasta de 0,80, a diferença entre o QR e o QR_{np} se acentua e o erro se torna progressivamente maior. O erro absoluto no cálculo da oxidação dos lipídios é o dobro do erro da oxidação dos carboidratos³³. Em pacientes gravemente enfermos com dispêndios calóricos entre 400 e 4.000 calorias, o erro relativo no cálculo da oxidação dos substratos varia de 9% a 44%, para os carboidratos, e de 15% a 59%, para os lipídios⁵⁹.

Nos pacientes internados, muitas vezes, não se

dispõe da excreção nitrogenada diária por ser esta de difícil determinação e sujeita a muitos erros. Costuma-se, então, empregar um valor médio para estimar a excreção nitrogenada. A equação de DeWeir assume uma excreção de 12 gramas diários. Já Bursztein *et al.* propõem uma excreção média de 18,25 gramas como um valor mais adequado para pacientes gravemente enfermos⁵⁹.

A equação mais utilizada para calcular a produção de energia (dispêndio calórico diário de repouso) é a equação simplificada de DeWeir^{2,42}:

$$\text{PE (kcal/dia)} = 3,9 \times \text{VO}_2 (\text{L/min}) + 1,1 \times \text{VCO}_2 (\text{L/min}) \times 1.440$$

EQUIPAMENTOS DE CALORIMETRIA INDIRETA

Os aparelhos de CI medem o VO_2 e o VCO_2 , analisando o ar inspirado e expirado pelo indivíduo num determinado período de tempo. De acordo com o princípio de funcionamento, os calorímetros são classificados em equipamentos de circuito fechado e equipamentos de circuito aberto^{16,28}.

Nos equipamentos de circuito fechado, o VO_2 e o VCO_2 são medidos por alterações no volume dentro de um reservatório fechado contendo oxigênio. Os aparelhos clássicos consistem de um espirômetro de selo d'água contendo oxigênio a 100%, um filtro com cal-sodada para absorver o gás carbônico e um circuito respiratório com válvula inspiratória e válvula expiratória²⁸. O indivíduo respira continuamente o gás contido no espirômetro por meio do sistema de válvulas direcionais. A redução no volume do gás contido no espirômetro, no período do exame, permite determinar o consumo do oxigênio. Esses aparelhos são considerados o padrão-ouro da calorimetria, pois foi com esse tipo de equipamento que se definiram as bases do metabolismo². Embora ainda utilizados para estudos de calorimetria de pequenos animais, poucos equipamentos para uso humano empregam esse princípio^{19,60}.

Na CI de circuito aberto, ambos os extremos do sistema se comunicam com o ambiente. O ar inspirado é mantido separado do ar expirado por meio de um sistema de válvulas unidirecionais. Nos estudos de fisiologia e, ocasionalmente, em estudos clínicos, o ar expirado é coletado em bolsa de Douglas ou espirômetro de Tissot e, depois, analisado por titulação por métodos convencionais ou analisadores eletrônicos^{7,10,61}. Os monitores metabólicos utilizados atualmente são instrumentos microprocessados que empregam analisadores rápidos de oxigênio e gás carbônico capazes de medir instantaneamente as alterações nas concentrações dos gases analisados. O analisador de O_2 pode ser do tipo eletroquímico que utiliza células de

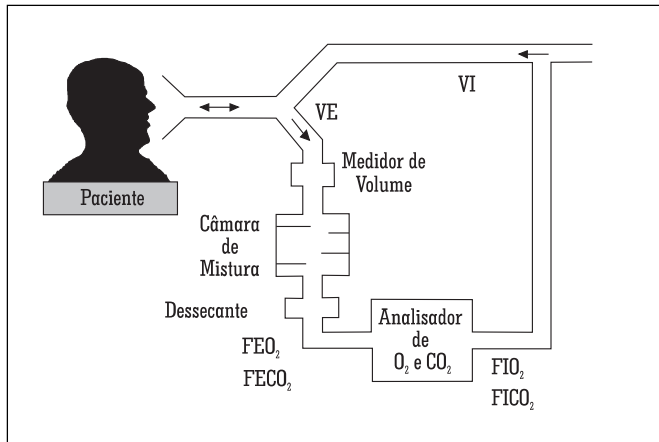


Fig. 1 — Diagrama de calorímetro indireto de circuito aberto com câmara de mistura (Baseado em Wilmore et al., 1976 e Branson, 1990).

óxido de zircônio ou paládio ou do tipo paramagnético. O analisador de CO₂ é do tipo sensor infravermelho e não é totalmente específico para o CO₂, podendo sofrer interferência na presença de outros gases, como o óxido nitroso^{2,10}. Os calorímetros indiretos de circuito aberto são classificados quanto ao sistema de análise dos gases em equipamentos de análise direta (*breath-by-breath*), equipamentos com câmara de mistura (*mixing chamber*) e equipamentos de análise por diluição do ar expirado^{15-17,62}. Tanto os equipamentos de análise direta quanto os de câmara de mistura, além da concentração de O₂ e CO₂, medem o volume dos gases inspirado e expirado por meio de medidores de volume. Esses equipamentos podem realizar medições em pacientes respirando espontaneamente através de máscara, bocal ou campânula ventilada, e em pacientes que estão em ventilação mecânica. Ambos os sistemas utilizam as mesmas equações matemáticas para o cálculo do VO₂ e VCO₂ a partir das concentrações de O₂ e CO₂ no ar inspirado (FIO₂, FICO₂) e expirado (FEO₂, FECO₂) e do volume-minuto inspiratório (VI) e expiratório (VE)^{2,10}:

$$VO_2 = VI \cdot (FIO_2) - VE \cdot (FEO_2) \quad VCO_2 = VE \cdot (FECO_2) - VI \cdot (FICO_2)$$

Em geral, apenas o VE é medido (fig.1), sendo o VI calculado a partir da transformação de Haldane, que pressupõe que o nitrogênio (N₂) é constante no ar inspirado (FIN₂) e no ar expirado (FEN₂)²:

$$VN_2 = (VI \cdot FIN_2) - (VE \cdot FEN_2) = 0 \quad VI = \frac{FEN_2 \cdot VE}{FIN_2}$$

Se não existirem outros gases presentes que não N₂, O₂ e CO₂, o N₂ inspirado e expirado pode ser determinado medindo-se só a concentração de O₂ e CO₂:

$$FIN_2 = 1 - FIO_2 - FICO_2 \quad FEN_2 = 1 - FEO_2 - FECO_2$$

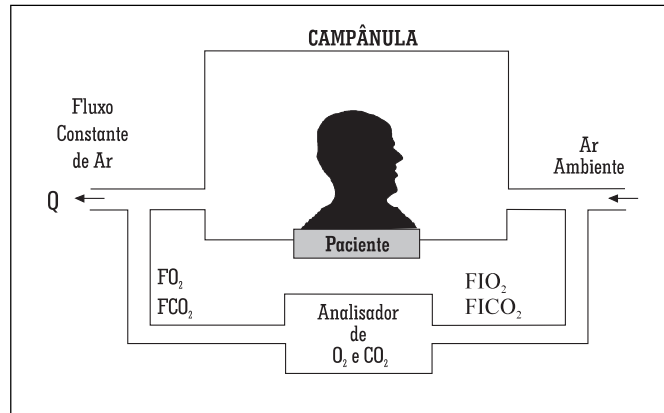


Fig. 2 — Diagrama de calorímetro indireto de circuito aberto que utiliza o princípio da diluição do ar expirado com campânula ventilada (Baseado em Ferrannini, 1988, e Weissman et al., 1990).

Substituindo-se na equação do VO₂, tem-se:

$$VO_2 = \frac{(1 - FEO_2 - FECO_2)}{1 - FIO_2} \cdot (FIO_2 - FEO_2) \cdot VE$$

Como a concentração do CO₂ no ar inspirado é próxima de zero, a transformação de Haldane não é necessária, logo^{10,33}:

$$VCO_2 = VE \cdot FECO_2$$

O sistema de diluição do ar expirado consiste de uma câmara de mistura de gases de 4 litros, um analisador paramagnético diferencial de O₂ de estado sólido, um analisador infravermelho de CO₂ e um sistema gerador de fluxo que produz um fluxo constante que dilui o gás expirado com ar ambiente⁶²⁻⁶⁴. Não existe medidor de volume de gases neste sistema que pode ser empregado tanto em pacientes em respiração espontânea quanto em pacientes sob ventilação mecânica. No modo ventilação mecânica, o gás expirado do ventilador é equilibrado na câmara de mistura e as concentrações do O₂ e CO₂ são medidas. Após passar na câmara de mistura, o gás expirado é diluído pelo fluxo de ar do gerador de maneira que o fluxo total (Q) pelo sistema é constante, aproximadamente de 40 litros por minuto. Um microprocessador controla a amostragem dos gases. O CO₂ é medido alternadamente no gás expirado (FECO₂) e no gás diluído com o fluxo de ar ambiente (FE*CO₂). O analisador paramagnético mede, diretamente, a diferença entre a concentração de O₂ no gás inspirado e expirado (FIO₂ - FEO₂) e também a concentração de O₂ no gás inspirado (FIO₂). O gás inspirado é amostrado no ramo inspiratório do circuito do ventilador mecânico. As equações matemáticas empregadas para cálculo são⁶⁴:

$$VCO_2 = Q \cdot FE*CO_2$$

Pela transformação de Haldane:

$$VO_2 = Q \cdot FE \cdot CO_2 \cdot \frac{FIO_2 - FEO_2}{FECO_2} - FIO_2$$

$$1 - FIO_2$$

No modo ventilação espontânea, o monitor emprega uma campânula plástica transparente ventilada, colocada sobre a cabeça do paciente. O gerador de fluxo mantém um fluxo constante do ar ambiente através da campânula para a câmara de mistura (fig. 2). Neste modo, o VO_2 e o VCO_2 são calculados pelas equações⁶⁴:

$$VCO_2 = Q \cdot FCO_2$$

$$VO_2 = \frac{Q}{1 - FIO_2} \cdot (FO_2 - FIO_2 \cdot FCO_2)$$

O FCO_2 e o FO_2 são obtidos por integração das diferenças de concentração de CO_2 e O_2 , respectivamente no gás inspirado e expirado, durante o tempo de medição.

EXECUÇÃO DO EXAME

Vários cuidados devem ser observados antes e durante a realização da CI para se obter um resultado acurado. Esses cuidados incluem aspectos relacionados ao ambiente, condições referidas ao paciente e aspectos técnicos relacionados ao monitor metabólico em si. O ambiente deve ser silencioso, com pouca iluminação e estar numa temperatura confortável, para evitar alterações causadas por frio ou ansiedade. O paciente deve estar em repouso há pelo menos 30 minutos e observar um jejum de 2 a 3 horas^{14,38}. Em pacientes que estejam recebendo suporte nutricional ou mesmo solução glicosada endovenosa, a taxa de infusão das soluções deve ser mantida constante^{19,42,46}. Pacientes com dor devem receber analgésicos uma hora antes do exame²¹. O monitor deve ser ligado, no mínimo, 30 minutos antes do exame para aquecimento e estabilização adequados. Os analisadores de O_2 e de CO_2 devem ser calibrados com gás de concentração conhecida antes de cada determinação e, periodicamente, validados com o emprego da chama de metanol⁶⁵.

Pacientes em assistência ventilatória mecânica necessitam cuidados adicionais para assegurar a validade do exame. Esses pacientes estão expostos a altas concentrações inspiratórias de O_2 e de umidade, com pressão elevada nas vias aéreas e com taxas de O_2 que podem flutuar bastante em curto período de tempo. É possível a ocorrência de vazamentos em vários pontos do circuito do ventilador. Muitas vezes, esses pacientes estão agitados, ansiosos, com dor e recebendo medicamentos e intervenções frequentes por parte da equipe de

saúde. Esses fatores podem alterar o dispêndio energético e as trocas gasosas, e devem ser considerados em todas as avaliações^{21,42,43,46}.

Recomenda-se não modificar o regime ventilatório por 90 minutos antes da medição, colocar o tubo coletor de amostra de gás inspirado o mais próximo possível do paciente, assegurar que não haja vazamentos nas conexões do circuito respiratório e, também, que o tubo traqueal esteja perfeitamente adaptado e sem vazamentos⁴². Deve-se evitar ventilação com relação inspiratória:expiratória invertida e níveis de pressão positiva expiratória acima de 5cm de H_2O , que falseiam as determinações das concentrações do O_2 e CO_2 . A concentração do O_2 no gás inspirado deve ser mantida abaixo de 60%, pois acima desse valor a estimativa do volume inspirado pela transformação de Haldane se torna imprecisa⁶⁶. A estabilização da concentração do O_2 no gás inspirado pode ser obtida pelo emprego de um misturador de ar e O_2 externo, ou colocando um segundo umidificador vazio no ramo inspiratório do circuito do ventilador, próximo ao paciente, para funcionar como câmara de mistura e homogeneizar o gás inspirado⁶⁷. A umidade dos gases amostrados também deve ser corrigida por meio de um sistema dessecante antes que eles sejam analisados^{21,42}.

A duração do exame depende da obtenção de um estado de equilíbrio metabólico e respiratório, caracterizado pela estabilidade das leituras obtidas. Esta condição de equilíbrio é reconhecida quando o VO_2 e o VCO_2 variam menos de 10% e o QR menos de 5% num intervalo de tempo de cinco minutos. O dispêndio energético medido nesse intervalo de cinco minutos extrapolado para 24 horas é considerado como representativo do dispêndio energético de repouso diário^{14,20,42}. Alguns pesquisadores recomendam um período inicial de adaptação de 5 a 10 minutos, para estabilização das leituras, e um período de medição de 20 minutos^{68,69}. Quando a leitura não estabiliza, recomenda-se estender a determinação para 25 minutos⁷⁰. Quando se utiliza o monitor metabólico como um parâmetro de perfusão tecidual, costuma-se medir continuamente o VO_2 até a normalização do estado hemodinâmico^{71,72}.

Algumas situações clínicas contra-indicam a realização da CI. Em portadores de fístula bronco-pleural com drenagem de tórax, a fuga dos gases inspirados e expirados impede uma determinação acurada. A difusão do CO_2 pela membrana de diálise também impossibilita a execução da calorimetria durante sessões de hemodiálise. A administração de lactulose pode falsear a medição do VO_2 , pois ela sofre fermentação no cólon e produz CO_2 ,

que é inicialmente absorvido e depois eliminado pelos pulmões^{21,42}.

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Uma interpretação adequada deve incluir análise do QR encontrado, comparação do estado metabólico encontrado, em relação ao previsto, e a estimativa da participação de cada substrato na produção de energia.

O QR encontrado costuma estar entre 0,67 e 1,30 (faixa fisiológica) e deve ser compatível com a ingesta nutricional nos últimos 3 a 4 dias. Valores fora desta faixa ou não compatíveis com o aporte nutricional ocorrem por falhas na técnica ou em condições clínicas específicas. Entre as causas técnicas, destacam-se analisadores de gases descalibrados e contaminação do gás expirado com ar ambiente⁴². O QR pode se alterar por hiperventilação ou hipoventilação, correção de acidose metabólica, cetose e diabetes melito descompensado^{1,21}.

O estado metabólico é classificado em normometabólico, hipermetabólico ou hipometabólico, pela comparação do dispêndio energético medido com o dispêndio teórico calculado⁶. Considera-se o paciente hipermetabólico quando o dispêndio de repouso medido está 10% ou mais acima do valor previsto⁴². Pacientes com dispêndios menores do que 90% do previsto são considerados hipometabólicos. Para se obter o dispêndio energético total, multiplica-se o dispêndio de repouso encontrado por 1,05 a 1,10, nos pacientes confinados ao leito, e por 1,20 a 1,30, naqueles pacientes com algum grau de atividade física fora do leito^{43, 73}.

Para se definir a participação de cada substrato energético na produção de energia é necessário conhecer, além do VO_2 e do VCO_2 , o valor da excreção do nitrogênio urinário nas 24 horas. Como a determinação do nitrogênio urinário não é realizada de rotina, emprega-se um valor médio para a excreção nitrogenada ao calcular a participação dos carboidratos e lipídios. Embora menos acurado, o valor médio permite uma estimativa aceitável da utilização dos substratos⁵⁹.

APLICAÇÕES CLÍNICAS DA CALORIMETRIA INDIRETA

A CI tem sido empregada no planejamento e na monitoração do suporte nutricional, na avaliação de pacientes com dificuldades para serem retirados da assistência ventilatória mecânica e na monitoração da perfusão tecidual em pacientes com instabilidade hemodinâmica.

A otimização do suporte nutricional dos pacien-

tes gravemente enfermos é, no momento, a maior indicação da CI². Como o dispêndio energético desses pacientes é muito variável, as estimativas baseadas em equações preditivas genéricas não são recomendadas, pois podem causar um erro considerável^{19,38,74}. Recomenda-se realizar a CI semanalmente, nos pacientes estáveis, e 2 a 3 vezes por semana, nos pacientes mais graves^{38,74}. Durante o suporte nutricional, a análise do QR permite identificar eventuais problemas com a utilização dos substratos calóricos e adequar a sua administração⁴⁸. Nos portadores de doenças pulmonares, a monitoração por CI pode evitar a administração de quantidades excessivas de nutrientes, com consequente precipitação de insuficiência respiratória por produção aumentada de CO_2 . Nesses pacientes, o QR deve ser mantido abaixo de 1,00 pela modificação da composição da solução nutritiva administrada e pela redução do aporte calórico total se ele estiver acima das necessidades medidas⁷⁵.

O custo metabólico da respiração, avaliado por CI, foi proposto como um indicador da probabilidade de sucesso no desmame de pacientes em assistência ventilatória mecânica. Definido como a diferença entre o VO_2 durante a respiração espontânea e durante a respiração sob ventilação mecânica, no adulto normal esse custo está em torno de 1-3% do VO_2 total⁷⁶. Embora não exista unanimidade nos estudos, um custo abaixo de 15% tem sido considerado como indicativo de sucesso no desmame⁷⁷⁻⁸¹.

A CI tem sido empregada para monitorar a perfusão tecidual global nos pacientes com instabilidade hemodinâmica. As variações no VO_2 desses pacientes traduziriam mudanças no estado da perfusão tecidual causadas por modificações na oferta do oxigênio^{82,83}. Utilizada de maneira contínua, a CI permitiria tanto a detecção precoce da hipoperfusão tecidual quanto a definição do ponto ideal de ressuscitação hemodinâmica^{84,85}. Recentemente, o comportamento do QR durante a monitoração contínua também foi considerado um parâmetro promissor para avaliar a perfusão tecidual e guiar a ressuscitação volêmica⁸⁶. A CI vem sendo testada associada à monitoração da saturação de O_2 do sangue venoso misto por cateter de Swan-Ganz com sensor oximétrico para medir continuamente o débito cardíaco. Esse sistema tem demonstrado boa correlação com medições do débito por termodiluição e é provável que entre em uso clínico nos próximos anos^{71,87,88}.

A CI deve se firmar como instrumento de monitoração no paciente gravemente enfermo e seu uso deverá aumentar nos próximos anos à medida que os equipamentos diminuam de preço e se tornem mais compactos e fáceis de operar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ferrannini E. The theoretical bases of indirect calorimetry: a review. *Metabolism* 1988; 37: 287-301.
2. Branson RD. The measurement of energy expenditure: instrumentation, practical considerations and clinical application. *Respir Care* 1990; 35: 640-59.
3. Durnin JA. Practical estimates of energy requirements. *J Nutr* 1991; 121: 1.907-13.
4. Webb P. The measurement of energy expenditure. *J Nutr* 1991; 121: 1.897-901.
5. Kinney JM. Energy requirements of the surgical patient. In Ballinger WF, Collins JA, Drucker WR *et al.*: *Manual of surgical nutrition*. Philadelphia, WB Saunders, 1975; 223-35.
6. Elwyn DH, Kinney JM, Askanazi J. Energy expenditure in surgical patients. *Surg Clin North Am* 1981; 61: 545-56.
7. Astrand PO, Rodahl K. *Textbook of work physiology*. New York, McGraw-Hill Book, 1970.
8. Mitchell JH, Blomqvist G. Maximal oxygen uptake. *N Engl J Med* 1971; 284: 1.018-22.
9. Wasserman K, Whipp BJ. Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis* 1975; 112: 219-49.
10. Jones NL. Equipment. In: *Clinical exercise testing*. 3rd ed. Philadelphia, WB Saunders, 1988; 269-86.
11. Dudrick SJ, Wilmore DW, Vars HM *et al.* Long-term total parenteral nutrition with growth, development, and positive nitrogen balance. *Surgery* 1968; 64: 134-42.
12. Dudrick SJ, Long JM, Steiger E *et al.* Parenteral hyperalimentation. *Med Clin North Am* 1970; 54: 90-106.
13. Cerra FB. The role of nutrition in the management of metabolic stress. *Crit Care Clin* 1986; 2: 807-19.
14. Mullen JL. Indirect calorimetry in critical care. *Proc Nutr Soc* 1991; 50: 239-44.
15. Beaver WL, Wassermann K, Whipp BJ. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J Appl Physiol* 1973; 34: 128-32.
16. Wilmore JH, Davis JA, Norton AC. An automated system for assessing metabolic and respiratory function during exercise. *J Appl Physiol* 1976; 40: 619-24.
17. Sue DY, Hansen JE, Blais M *et al.* Measurement and analysis of gas exchange during exercise using a programmable calculator. *J Appl Physiol* 1991; 49: 456-61.
18. Takala J, Keinänen O, Väisänen P *et al.* Measurement of gas exchange in intensive care; laboratory and clinical validation of a new device. *Crit Care Med* 1989; 17: 1.041-7.
19. Mann S, Wenstenskow DR, Houtchens BA. Measured and predicted caloric expenditure in the acutely ill. *Crit Care Med* 1985; 13: 173-7.
20. Van Lanschot JJB, Feenstra BWA, Vermeij CG *et al.* Calculation versus measurement of total energy expenditure. *Crit Care Med* 1986; 13: 981-5.
21. Weissman C, Kemper M. Metabolic measurements in the critically ill. *Crit Care Clin* 1995; 11: 169-97.
22. Smyrniotis NA, Curley FJ. Indirect calorimetry. In Rippe JM, Irwin RS, Fink MP, Cerra FB (eds): *Intensive care medicine*. 3rd edition. Boston, Little, Brown, 1996; 295-9.
23. Benzinger TH. Thermodynamics of living matter: physical foundations of biology. *Am J Physiol* 1983; 244: R743-R750.
24. Welch GR. Thermodynamics and living systems: problems and paradigms. *J Nutr* 1991; 121: 1.902-6.
25. Mueller CB, Thomas EJ. Nutritional needs of the normal adult. In Ballinger WF, Collins JA, Drucker WR (eds): *Manual of surgical nutrition*. Philadelphia, WB Saunders, 1975; 142-65.
26. McCoy S, Drucker WR. Carbohydrate metabolism. In Ballinger WF, Collins JA, Drucker WR (eds): *Manual of surgical nutrition*. Philadelphia, WB Saunders, 1975; 13-32.
27. Cahill Jr GF. Intermediary metabolism of protein, fat and carbohydrate. In Thorn GH, Adams RD, Braunwald E (eds): *Harrison's Principles of Internal Medicine*. 8th ed. New York, McGraw-Hill Book, 1977; 352-64.
28. Houssay BA, Caldeyro-Barcia R, Covian MR *et al.* El intercambio material y energético del organismo. In: *Fisiología humana*. Buenos Aires, Librería El Ateneo Editorial, 1969; 487-502.
29. Bogardus C, Lillioja S, Ravussin E *et al.* Familial dependence of the resting metabolic rate. *N Engl J Med* 1986; 315: 96-100.
30. Devlin JT, Horton ES. Necesidades energéticas. In: *Conocimientos actuales sobre nutrición*. 6^a ed. Washington, OPAS, 1991; 1-7.
31. Owen OE. Resting metabolic requirements of men and women. *Mayo Clin Proc* 1988; 63: 503-10.
32. Chioléro R, Flatt J, Revelly J *et al.* Effects of catecholamines on oxygen consumption and oxygen delivery in critically ill patients. *Chest* 1991; 100: 1.676-84.
33. Simonson DC, DeFronzo R. Indirect calorimetry: methodological and interpretative problems. *Am J Physiol* 1990; 258: E399-E412.
34. Molina P, Bursztein S, Abumrad N. Theories and assumptions on energy expenditure. *Crit Care Clin* 1995; 11: 587-601.
35. Moore FD, Brennan MF. Surgical injury: body composition, protein metabolism, and neuroendocrinology. In Ballinger WF, Collins JA, Drucker WR (eds): *Manual of surgical nutrition*. Philadelphia, WB Saunders, 1975; 169-222.
36. Rolih CA, Ober KP. The endocrine response to critical illness. *Med Clin North Am* 1995; 179: 211-24.
37. Way III CWV. Nutritional support in the injured patient. *Surg Clin North Am* 1991; 71: 537-48.
38. Dickerson RN, Vehe KL, Mullen JL *et al.* Resting energy expenditure in patients with pancreatitis. *Crit Care Med* 1991; 19: 484-90.
39. Vermeij CG, Feenstra BWA, Oomen AMF *et al.* Assessment of energy expenditure by indirect calorimetry in healthy subjects and patients with liver cirrhosis. *JPEN* 1991; 15: 421-25.
40. Siegel JH. Relation between circulatory and metabolic changes in sepsis. *Ann Rev Med* 1981; 32: 175-94.
41. Hotchkiss RS, Karl IE. Reevaluation of the role of cellular hypoxia and bioenergetic failure in sepsis. *JAMA* 1992; 267: 1.503-10.
42. McClave SA, Snider HL, Greene L *et al.* Effective utilization of indirect calorimetry during critical care. *Intensive Care World* 1992; 9: 194-200.
43. Weissman C, Kemper M, Damask MC *et al.* Effect of routine intensive care interactions on metabolic rate. *Chest* 1984; 86: 815-8.
44. Weissman C, Kemper M, Elwyn DH *et al.* The energy expenditure of the mechanically ventilated critically ill patient. *Chest* 1986; 89: 254-9.
45. Bruder N, Lassegue D, Pelissier D *et al.* Energy expenditure and withdrawal of sedation in severe head-injured patients. *Crit Care Med* 1994; 22: 1.114-9.
46. Swinamer DL, Phang PT, Jones RL *et al.* Twenty-four hour energy expenditure in critically ill patients. *Crit Care Med* 1987; 15: 637-43.
47. Weissman C, Kemper M, Askanazi J *et al.* Resting metabolic rate of the critically ill patient: measured versus predicted. *Anesthesiol* 1986; 64: 673-9.
48. Makk LJ, McClave SA, Creech PW *et al.* Clinical application of the metabolic cart to the delivery of total parenteral nutrition. *Crit Care Med* 1990; 18: 1.320-7.
49. Quebbeman EJ, Ausman RK, Schneider TC. A re-evaluation of energy expenditure during parenteral nutrition. *Ann Surg* 1981; 195: 282-6.

50. Elia M. Changing concepts of nutrient requirements in disease: implications for artificial nutritional support. *Lancet* 1995; 345: 1.279-84.
51. Swinamer DL, Grace MG, Hamilton SM *et al.* Predictive equation for assessing energy expenditure in mechanically ventilated critically ill patients. *Crit Care Med* 1990; 18: 657-61.
52. Ireton-Jones CS, Turner Jr WW, Liepa GU *et al.* Equations for the estimation of energy expenditure in patients with burns with special reference to ventilatory status. *J Burn Care Rehabil* 1992; 13: 330-3.
53. Sherman MS. A predictive equation for determination of resting energy expenditure in mechanically ventilated patients. *Chest* 1994; 106: 544-9.
54. Frankenfield DC, Omert LA, Badellino MM *et al.* Correlation between measured energy expenditure and clinically obtained variables in trauma and sepsis patients. *JPEN* 1994; 18: 398-403.
55. Gagliardi E, Brathwaite CEM, Ross SE. Predicting energy expenditure in trauma patients: validation of the Ireton-Jones equation. *JPEN* 1995; 19(suppl): 22S.
56. Ben-Porat M, Sideman S, Bursztein S. Energy metabolism rate for fasting and postabsorptive subjects. *Am J Physiol* 1983; 244: R764-R769.
57. Livesey G, Elia M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry. *Am J Clin Nutr* 1988; 47: 608-28.
58. Swyer PR. Assumptions used in measurements of energy metabolism. *J Nutr* 1991; 121: 1.891-6.
59. Bursztein S, Saphar P, Singer P *et al.* A mathematical analysis of indirect calorimetry measurements in acutely ill patients. *Am J Clin Nutr* 1989; 50: 227-30.
60. Yamada TM, Gonçalves EL, Waitzberg DL *et al.* Modelo de calorimetro indireto experimental. *Acta Cir Bras* 1989; 4: 30-5.
61. Chan ATH, Fleming CR, O'Fallon WM *et al.* Estimated versus measured basal energy requirements in patients with Crohn's disease. *Gastroenterology* 1986; 91: 75-8.
62. Phang PT, Rich T, Ronco J. A validation and comparison study of two metabolic monitors. *JPEN* 1990; 14: 259-61.
63. Makita K, Nunn JF, Royston B. Evaluation of metabolic measuring instruments for use in critically ill patients. *Crit Care Med* 1990; 18: 638-44.
64. Weissman C, Sardar A, Kemper M. *In vitro* evaluation of a compact metabolic measurement instrument. *JPEN* 1990; 14: 216-21.
65. Damask MC, Weissman C, Askanazi J *et al.* A systematic method for validation of gas exchange measurements. *Anesthesiol* 1982; 57: 213-8.
66. Westenskow DR, Cutler CA, Wallace WD. Instrumentation for monitoring gas exchange and metabolic rate in critically ill patients. *Crit Care Med* 1984; 12: 183-7.
67. Browning JA, Linberg SE, Turney SZ. The effects of a fluctuating FiO₂ on metabolic measurements in mechanically ventilated patients. *Crit Care Med* 1982; 2: 82-5.
68. Isbell TR, Klesges RC, Meyers AW *et al.* Measurement reliability and reactivity using repeated measurements of resting energy expenditure with a face mask, mouthpiece, and ventilated canopy. *JPEN* 1991; 15: 165-8.
69. Stokes MA, Hill GL. A single, accurate measurement of resting metabolic expenditure. *JPEN* 1991; 15: 281-7.
70. Cunningham KF, Aeberhardt LE, Wiggs BR *et al.* Appropriate interpretation of indirect calorimetry for determining energy expenditure of patients in intensive care units. *Am J Surg* 1994; 167: 547-9.
71. Feustel PJ, Perkins RJ, Oppenlander JE *et al.* Feasibility of continuous oxygen delivery and cardiac output measurements by application of the Fick principle. *Am J Respir Crit Care Med* 1994; 149: 751-8.
72. Wahr JA, Tremper K. Noninvasive oxygen monitoring techniques. *Crit Care Clin* 1995; 11: 199-217.
73. Hanique G, Dugernier T, Laterre PF *et al.* Significance of pathologic oxygen supply dependency in critically ill patients. *Intens Care Med* 1994; 20: 12-8.
74. Hunter DC, Jaksic T, Lewis D *et al.* Resting energy expenditure in the critically ill: estimations versus measurement. *Br J Surg* 1988; 75: 875-8.
75. Askanazi J, Weissman C, Rosenbaun SH *et al.* Nutrition and the respiratory system. *Crit Care Med* 1982; 10: 163-72.
76. Field S, Kelly SM, Macklem PT. The oxygen cost of breathing in patients with cardiorespiratory disease. *Am Rev Respir Dis* 1982; 126: 9-13.
77. Kemper M, Weissman C, Askanazi J *et al.* Metabolic and respiratory changes during weaning from mechanical ventilation. *Chest* 1987; 92: 979-83.
78. Hubmayr RD, Loosbrock LM, Gillespie DJ *et al.* Oxygen uptake during weaning from mechanical ventilation. *Chest* 1988; 94: 1.148-55.
79. Räsänen J, Puhakka K, Leijala M. Spontaneous breathing and total body oxygen consumption in children recovering from open-heart surgery. *Chest* 1992; 101: 662-7.
80. McDonald NJ, Lavelle P, Gallacher WN *et al.* Use of the oxygen cost of breathing as an index of weaning ability from mechanical ventilation. *Intens Care Med* 1988; 14: 50-4.
81. Shikora SA, Bistran BR, Borlase BC *et al.* Work of breathing: reliable predictor of weaning and extubation. *Crit Care Med* 1990; 18: 157-62.
82. Shoemaker WC, Appel PL, Kram HB. Oxygen transport measurements to evaluate tissue perfusion and titrate therapy: dobutamine and dopamine effects. *Crit Care Med* 1991; 19: 672-88.
83. Smithies MN, Royston B, Makita K *et al.* Comparison of oxygen consumption measurements: indirect calorimetry versus the reversed Fick method. *Crit Care Med* 1991; 19: 1.401-6.
84. Skootsky SA, Abraham E. Continuous oxygen consumption measurement during initial emergency department resuscitation of critically ill patients. *Crit Care Med* 1988; 16: 706-9.
85. Shoemaker WC, Parsa MH. Invasive and noninvasive physiologic monitoring. In Shoemaker WC, Ayres SM, Grenvik A (eds): *Textbook of critical care*. 3rd ed. Philadelphia, WB Saunders, 1995; 252-66.
86. Cohen IL, Sheik FM, Perkins RJ *et al.* Effect of hemorrhagic shock and reperfusion on the respiratory quotient in swine. *Crit Care Med* 1995; 23: 545-52.
87. Keinänen O, Takala J, Kari A. Continuous measurement of cardiac output by the Fick principle: clinical validation in intensive care. *Crit Care Med* 1992; 20: 360-5.
88. Räsänen J. Supply-dependent oxygen consumption and mixed venous oxyhemoglobin saturation during isovolemic hemodilution in pigs. *Chest* 1992; 101: 1.121-4.