

Radiação ultravioleta residual de lâmpadas fluorescentes no tratamento da hiperbilirrubinemia neonatal

*Patrícia Moura Alves**, *Victor Carvalho dos Santos**
*e Domingos D'Oliveira Cardoso***

Resumo

No recém-nascido, o elevado nível de bilirrubina pode lesar o sistema nervoso. A bilirrubina é tratada fotoquimicamente por radiação luminosa. Este estudo⁴⁸ não contraria a interpretação dos efeitos terapêuticos obtidos nos estudos médicos. Em 50 anos de tratamento da hiperbilirrubinemia, a ênfase tem sido a aplicação de unidades de fototerapia de luz fluorescente ou halógena, experiência médica que tem dado certo. Este estudo⁴⁸ focaliza, porém, a interpretação do mecanismo físico envolvido, contrariando a idéia da ação exclusiva da luz visível azul na quebra de ligações químicas da bilirrubina, que incorre em erro sistemático relativo à presença da radiação UV participando do mecanismo. Nos resultados experimentais do estudo de Fadhil M. Salih, Sultan Qaboos University, sob as mesmas condições, a eficiência da luz solar na isomerização da bilirrubina coincide com a de unidade de fototerapia. A luz solar é uma luz quente, e a luz de unidade de fototerapia é uma luz fria. Isso impõe calor acima do efeito que influencia o processo fotolítico. Este estudo conclui que a radiação UV residual de lâmpadas fluorescentes ou halógenas sofre transformações de comprimento de onda ao participar dos processos de espalhamento Mie e Rayleigh na ação de transferir energia para a derme, sob forma de calor, com elevação de temperatura, facilitando a ação do azul na fotoisomerização da bilirrubina.

Palavras-chave

Radiação UV, icterícia, hiperbilirrubinemia.

Introdução

Cerca de 40 estudos representativos da literatura médica neonatal apresentam a lâmpada fluorescente ou halógena como fonte óptica. Na

lâmpada fluorescente ou halógena ocorre emissão ultravioleta secundária como parte do mecanismo de geração da radiação óptica visível. O objetivo deste estudo é mostrar a participação da radiação UV no mecanismo de tratamento da

*Instituto Militar de Engenharia

**Comissão Nacional de Energia Nuclear

hiperbilirrubinemia, a partir do fato de que no uso da radiação solar a radiação UVA está presente; no uso de lâmpadas fluorescentes ou halógenas, a radiação UVA está presente e nos casos de uso de fontes LED, para o mesmo resultado terapêutico, o valor da irradiância é o dobro, uma compensação relativa à ausência da radiação UV.

Conceitos básicos relativos a fototerapia neonatal

Icterícia fisiológica e hiperbilirrubinemia neonatal

A bilirrubina é um pigmento amarelo-alaranjado originário da hemoglobina. Um grama de hemoglobina fornece 35mg de bilirrubina. No recém-nascido, a produção de bilirrubina é o dobro da do adulto.¹ Os glóbulos vermelhos circulam em média 120 dias antes de serem destruídos. Quando ocorre o seu rompimento, a hemoglobina liberada é absorvida pelas células do retículo endotelial em todo o organismo, onde sofre diversas transformações até o estágio de bilirrubina não-conjugada.² No soro existem normalmente dois tipos de bilirrubina: a bilirrubina não-conjugada, ou indireta, formada a partir da hemoglobina, sendo insolúvel em água, é de difícil excreção; e a bilirrubina conjugada, ou livre, cujo pigmento resultante é hidrossolúvel e polar o suficiente para ser excretado na bile pelo fígado, filtrado através dos rins para a urina, ou transformado em urobilinogênio e excretado nas fezes pelo intestino. Grande quantidade de bilirrubina não-conjugada nos líquidos extracelulares é a causa mais comum da icterícia, observada pela coloração amarelada dos tecidos orgânicos, principalmente pele e esclerótica dos olhos. Durante o período neonatal, o tipo mais comum de icterícia é a chamada “icterícia fisiológica” ou “icterícia própria” do recém-nascido.

Nos primeiros dias de vida, cerca de 50 a 75% dos recém-nascidos apresentam icterícia visível. Todas as crianças exibem, neste período, uma concentração plasmática de bilirrubina não-conjugada muito acima do normal. Este tipo de icterícia, icterícia fisiológica, é resultante de vários fatores, principalmente da imaturidade hepática do recém-nascido, quando o mecanismo natural de eliminação da bilirrubina da circulação sanguínea não está ainda em perfeito funcionamento.² A hiperbilirrubinemia neonatal é uma condição clínica reversível, mas a sua acentuação pode levar a ocorrência de uma encefalopatia bilirrubínica ou *kernicterus* (icterícia nuclear, em alemão), que produz seqüelas no sistema nervoso central e pode levar à morte. A prevenção da hiperbilirrubinemia pode ser feita de dois modos: fisicamente, por exsangüinotransfusão, na qual o sangue do recém-nascido é trocado; e fotoquimicamente,⁵ expondo o recém-nascido à radiação luminosa, denominada fototerapia. A troca sanguínea é mais utilizada quando a icterícia é mais intensa ou na presença de doença hemolítica. A fototerapia comparada à troca sanguínea é um processo mais simples e mais eficiente com menos efeitos danosos por reduzir de forma mais prolongada os níveis de bilirrubina.

Kernicterus

Kernicterus, icterícia nuclear em alemão, é um termo utilizado primeiro por Schmorl, em 1904, para designar a ocorrência de uma pigmentação amarelada na glândula basal no cérebro de crianças que morreram logo após ou durante o ataque de icterícia acentuada.²

Entre os recém-nascidos a termo que adquirem a doença, cerca de 50% morrem. A mortalidade é maior para prematuros, em torno de 75%.

Fototerapia neonata^{6,7}

O mecanismo básico de ação da fototerapia é a conversão das moléculas de bilirrubina em formas menos tóxicas através de reação fotoquímica em que a bilirrubina, uma das poucas substâncias do corpo que absorve o azul é o foto-receptor primário. Até hoje, dois mecanismos gerais de reação foram demonstrados: a foto-oxidação, na qual a molécula do pigmento é fisicamente destruída, e a foto-isomerização, em que é convertida em forma mais hidrossolúvel.

Estudos clínicos mostram a existência de três fatores majoritários que influenciam no tratamento e conseqüentemente na eficácia da fototerapia:

- a) O espectro da luz emitida pela unidade de fototerapia, determinado pelo tipo de fonte luminosa utilizada e pelos filtros ópticos utilizados. Devido às características ópticas da molécula de bilirrubina e à atenuação da pele, os comprimentos de onda mais efetivos se encontram na região azul esverdeada do espectro visível;
- b) A irradiância incidente depende da potência da fonte óptica, mas também da distância da fonte ao paciente. A potência óptica da luz emitida pela fototerapia constitui o fluxo de energia incidente sobre o recém-nascido;
- c) A superfície corporal do recém-nascido exposta à radiação luminosa.

Dosimetria de exposição à radiação óptica – Terminologia

• **Medida de radiação** – terminologia:³ A densidade de fluxo radiante incidente em uma superfície, chamada irradiância, é expressa em W/m^2 . Quando a medida se refere à determinada região do espectro de radiação (no caso, entre 425 a 475nm, região azul do espectro visível), a

irradiância é chamada irradiância espectral, expressa em $\mu W/(cm^2.nm)$.

• **Conceito de dose:** Observa-se nos artigos científicos sobre fototerapia a utilização de diferentes unidades para medidas de grandezas relativas à fototerapia, e para designação de dose de irradiação recebida. Neste trabalho é relevante convencionar os conceitos de *dose incidente* sobre a pele e de *dose absorvida* nas subcamadas da pele.

• **Dose de energia incidente:** A dose incidente ou dose de exposição se refere à quantidade de energia de radiação incidente numa superfície, expressa como irradiância, durante um tempo especificado. Para um determinado intervalo de tempo, a integral no tempo da irradiância é designada “*dose de energia incidente*”, em unidades de J/m^2 ou múltiplos. A dose incidente a nível espectral se refere à quantidade de energia, expressa como irradiância de uma componente espectral, incidente numa superfície, durante um tempo especificado, designada “*dose de energia incidente espectral*”, ou “dose espectral”⁴ simplesmente, expressa em unidades de $J/(m^2.nm)$ ou múltiplos.

• **Parcela absorvida de dose de energia incidente:**⁴ A dose de energia absorvida se refere a quantidade de energia depositada pela radiação em um ponto, durante um tempo especificado, em unidade de J/m^2 ou múltiplos. A quantidade de energia absorvida é tratada aqui como “*parcela absorvida de dose de energia incidente (percentual)*”.

Fontes ópticas de fototerapia

Os tipos de lâmpadas mais comuns utilizados em fototerapia são as lâmpadas fluorescentes brancas (*daylight*) e azul, luz monocromática azul (*special blue*) e lâmpadas de quartzo halogênio com filamento de tungstênio. As lâmpadas halógenas de tungstênio de alta temperatura emitem quantidades significativas de UVB.⁴

A maior parte das fontes artificiais emite espectro contínuo de UV.

Radiação solar⁸ e radiação ultravioleta^{4,9}

A distribuição espectral e a quantidade total de energia solar alcançando a superfície da terra são fatores ambientais de elevada importância. O valor da irradiância solar ao nível do mar varia com a latitude, a longitude, a estação do ano e com vários fatores climáticos. Um valor típico da irradiância solar ao nível do mar é 1350 W/m².

A energia óptica solar que alcança a superfície terrestre se distribui percentualmente⁹ de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 – Radiação Óptica Solar.

Radiação solar	Faixa [nm]	% de energia que chega à Terra	Característica de interação
UVC	200 – 280		Absorvida pela camada de ozônio
UVB	280 – 320	0,1	Não penetra profundamente na camada cutânea. É absorvida em cima da derme
UVA	320 – 400	4,9	Energia muito menor que UVB. Penetra profundamente na derme
Visível	400 – 700	40	Papel coadjuvante no fotoenvelhecimento cutâneo
Infravermelho	700 – 10000	55	A ação prolongada do calor provoca efeitos secundários na pele

Os comprimentos de onda entre 100 e 400nm constituem o espectro eletromagnético da radiação ultravioleta, dividido em três regiões, com base

em suas propriedades de absorção biológica. A radiação UVC, entre 100 e 280nm, filtrada pela camada de ozônio da atmosfera terrestre, é extremamente tóxica, letal para muitos microorganismos e a maior parte dos vegetais. A radiação UVB, entre 280 e 320nm, representa cerca de 2% da radiação que alcança a superfície da terra. A radiação UVA, entre 320 e 400nm, representa cerca de 98% da radiação UV que atinge a superfície terrestre.

A região UVA divide-se em UVA I (340-400nm) e UVA II (320-340nm). A radiação UVA tem intensidade independente da hora do dia e não exige sinal de alerta em caso de exposição excessiva, como a queimadura causada pela radiação UVB. A UVA possui maior capacidade de penetração na água do que a UVB. O vidro de janela de 3mm bloqueia cerca de 96,5% da radiação UVB, e cerca de 15% da radiação UVA. Os vidros de carros são mais eficazes, 90,2% no caso da UVB e 30% no caso da UVA.⁹

Pele humana

A pele é o tecido mais externo do corpo e o maior órgão, não só em termos de peso como também em área da superfície, de aproximadamente 1,5m² em adultos. A função básica da pele é a prevenção da evaporação de água, da perda de íons e de proteínas. A pele funciona como primeiro estágio de proteção contra agentes de risco (produtos químicos) ou circunstância de exposição (radiações).

Estrutura da pele humana⁴

A pele é uma estrutura complexa constituída de células, fibras e outros componentes, resultando uma estrutura multicamadas. Os elementos de nível celular formam três camadas na pele: epiderme, derme e subcutânea, diferenciadas

em termos de estrutura e função em relação à interação com a radiação luminosa.

a) Epiderme:^{4,10} A epiderme constitui a camada mais externa da pele, de espessura variando de 50 a 600µm, dependendo da localização no corpo. A espessura varia de acordo com o volume de água que a epiderme retém. Não há veias e capilares nesta camada. A epiderme é um tecido metabolicamente ativo, dividida em cinco subcamadas: *stratum basale*, *stratum spinosum*, *stratum granulosum*, *stratum lucidum* e *stratum corneum*.

b) Derme:^{4,10} A derme é a segunda camada da pele, abaixo da camada epidermal, constituindo um tecido conectivo que proporciona elasticidade à pele, sua espessura varia de 1 a 4mm. Os principais componentes da derme são o colágeno e as fibras elásticas. Comparada à epiderme, há muito menos células e muito mais fibras na derme. A derme é dividida em duas subcamadas: camada papilar e camada reticular. A melanina está presente somente na epiderme, e a hemoglobina é encontrada somente na derme. Assim, ao analisar as propriedades de absorção da pele, a epiderme é considerada essencialmente uma camada da melanina, e a derme, de hemoglobina.¹⁰

c) Subcutâneo:^{4,10} O tecido subcutâneo ou hipoderme, em histologia, é a terceira camada abaixo da derme. É importante notar que ela não é classificada como outra camada da pele. A subcutânea é uma camada elástica e inclui uma grande quantidade de células de gordura que trabalham como absorvedor de impacto para os vasos sanguíneos e terminações nervosas.¹⁰ Sua espessura, da ordem de 10mm, varia com a região do corpo numa mesma pessoa e de pessoa para pessoa para a mesma região do corpo.

Efeitos de absorção e de reflexão da radiação UV no tecido biológico

A determinação do calor resultante da irradiância da radiação de fonte UV é feita a partir da contribuição da teoria de transferência de calor por irradiação.¹¹

O aspecto central do modelo matemático para cálculo da irradiância da lâmpada está baseado na figura analítica do “*fator de visão da radiação*”, que permite determinar a fração da energia radiativa difusa emitida por uma superfície e absorvida por outra superfície. O modelo do “*fator de visão da radiação*” é mais geral, por se aplicar a todas as distâncias.¹¹

A constituição e a estruturação do meio biológico propagante produzem uma ação do meio sobre a radiação UV, que sofre transformações de comprimento de onda na sua ação de resposta, para transferir energia para o meio, sob a forma de calor.¹¹

Propriedades ópticas do tecido humano

As propriedades ópticas da pele interagem com a radiação óptica segundo três mecanismos básicos: reflexão, absorção e espalhamento.⁴

O espalhamento óptico Mie produzido pela derme é modelado como espalhamento de conjuntos de fibras de colágeno. Para a derme ocorre um componente adicional de espalhamento Rayleigh, devido às estruturas de pequena escala da derme. As fibras colágenas são as maiores fontes de espalhamento na derme da pele.¹²

A absorção nos tecidos é dominada por proteína e absorção de água nas regiões de ultravioleta e de infravermelho, respectivamente. Para a radiação UV, a absorção ocorre num comprimento de onda no qual as moléculas possuem espectro característico de absorção. O sangue e a melanina exercem influência importante nas regiões de UVA e visível.¹²

Argumentação histórica do tratamento pela radiação visível azul

Tratamento da hiperbilirrubinemia neonatal pela radiação visível

Os princípios fotoquímicos da fototerapia foram observados por Fisher e Herrle em 1938,¹³ a partir da descoberta da bilirrubina ser susceptível à fotodestruição. A primeira aplicação clínica conhecida foi efetuada por Cremer et al., em 1958, que verificou o decréscimo na concentração de bilirrubina de recém-nascido exposto à radiação luminosa visível.

Cremer construiu uma unidade fototerápica utilizando lâmpadas fluorescentes. Desde sua introdução, em 1958, a fototerapia tem sido utilizada em neonatologia, utilizando como fonte de radiação lâmpadas fluorescentes⁵ e mais recentemente lâmpadas halógenas.

A relação seguinte de estudos publicados, indicados por título, autor e ano de publicação, constitui um histórico representativo dos estudos referentes a Hiperbilirrubinemia Neonatal:

1. Influence of light on the hyperbilirubinemia of infants⁵ (Cremer, 1958);
2. Super iluminação na hiperbilirrubinemia do recém-nascido¹⁴ (Costa Pereira, 1960);
3. Spectral reflectance of the skin¹⁵ (Ballowitz, 1970);
4. Phototherapy in hyperbilirubinemia¹⁶ (Sandra, 1971);
5. Phototherapy of jaundice in newborns infants I¹⁷ (Sisson, 1971);
6. Phototherapy of jaundice in newborns infants II¹⁸ (Sisson, 1972);
7. Fetal and neonatal medicine¹⁹ (LeRoy, 1973);
8. Skin reflectance²⁰ (Schreiner, 1979);
9. The optics of human skin²¹ (Rox, 1981);
10. Mathematical description²² (Wiese, 1982);
11. Phototherapy neonatal jaundice: isomers of bilirubin²³ (McDonagh, 1982);
12. Phototherapy for hyperbilirubinemia: the importance of dose²⁴ (Modi, 1983);
13. Phototherapy for jaundice: optimal wavelengths of light²⁵ (Ennever, 1983);
15. Lights on transport and excretion of bilirubin in newborns²⁶ (McDonagh, 1985);
16. UV levels associated with fluorescent lighting..., NRPB-R221²⁷ (Whillock, 1988);
17. Fototerapia: nem tudo que ilumina trata, IFF/FIOCRUZ/MS² (Carvalho, 1990);
18. Fluorescent lighting and malignant melanoma, guidelines²⁸ (IRPA/INIRC, 1990);
19. Efficacy blue light²⁹ (Tan, 1992);
20. The association of melanoma and fluorescent light exposure³⁰ (Walter, 1992);
21. A new light³¹ (Diane, 1992);
22. Lâmpadas fluorescentes para fototerapia³² (Carvalho, 1992);
23. Tissue optical properties in the visible and NIR regions¹² (Jacques, 1996);
24. Controvérsias em icterícia neonatal⁶ (Carvalho, 1998);
25. UVR from fluorescent lamps³³ (Pearson, 1998);
26. Fototerapia integral de alta intensidade⁷ (Carvalho, 1999);
27. Recentes avanços em fototerapia⁷ (Carvalho, 1999);
28. The reflectance spectrum of human skin³⁴ (Angelopoulou, 1999);
29. Bili large skin area³⁵ (Niki, 2000);
30. Avaliação dos equipamentos de fototerapia³⁶ (Kliemann, 2001);
31. Desenvolvimento de sistema óptico¹³ (Silva, 2001);
32. Full-spectrum fluorescent lighting³⁷ (McColl, 2001);
33. Can sunlight replace phototherapy units in treatment of jaundice³⁸ (Salih, 2001);
34. Icterícia do recém-nascido: aspectos atuais¹ (Ramos, 2002);

- 35. The optical properties of skin³⁹ (Su, 2002);
- 36. Heat effects of microwave skin by multilayer human skin model⁴⁰ (Ozen 2003);
- 37. Avaliação da exposição UV em um ambiente ocupacional⁴¹ (Martins, 2003);
- 38. Avaliação clínica da icterícia⁴² (Dal MORO, 2004);
- 39. O uso da fototerapia em recém-nascidos⁴³ (Carvalho, 2004);
- 40. Use of light emitting diode⁴⁴ (Rosen, 2005);
- 41. Treatment of jaundice⁴⁵ (Maisels, 2005);
- 42. Icterícia neonatal⁴⁶ (Comitê de Neonatologia – MG, 2005).

Cronologia dos estudos da hiperbilirrubinemia neonatal, relativos à região do azul

A fototerapia é o processo mais utilizado para prevenção e tratamento da hiperbilirrubinemia

neonatal. O mecanismo básico da ação da fototerapia é a conversão das moléculas de bilirrubina em formas menos tóxicas. O principal mecanismo de ação da fototerapia é a fotoisomerização da bilirrubina, transformando-as em produtos hidrossolúveis.

A bilirrubina, como apresentado por alguns autores,^{2,24} absorve luz no comprimento de onda de 400 a 500nm, no espectro azul. No estudo de Lathe e Walker,⁵ em 1957, notou-se que a bilirrubina *in vitro* é muito foto-sensível. Verificou-se que a região do espectro azul é a mais ativa na fotooxidação, transformando a bilirrubina em biliverdina, excretada pelos rins e fígado. A tabela 2 apresenta as faixas de comprimento de onda utilizadas no estudo da icterícia neonatal referenciadas por autor e ano.

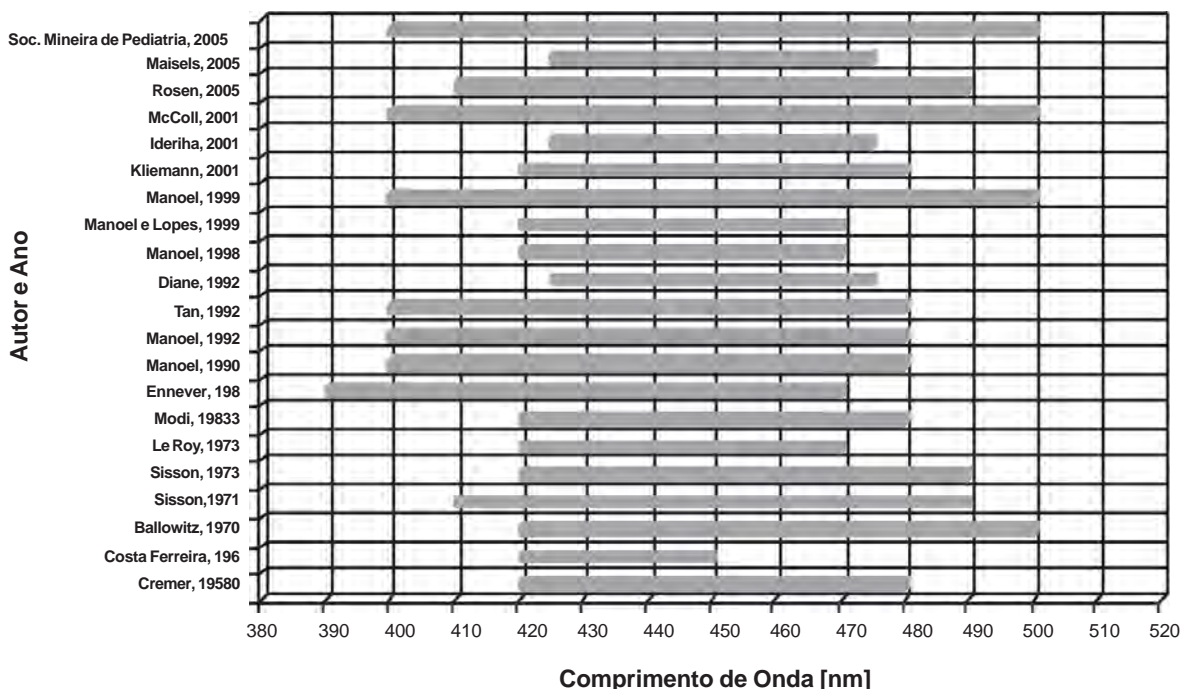


Figura 1 – Gráfico da região do espectro utilizado no tratamento da hiperbilirrubinemia neonatal.

Tabela 2 – Região do espectro utilizada no tratamento da hiperbilirrubinemia neonatal.

AUTOR / ANO	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
Cremer, ⁵ 1958	420 – 480	60
Costa Ferreira, ¹⁴ 1960	420 – 450	30
Ballowitz, ¹⁵ 1970	420 – 500	80
Sisson, ¹⁷ 1971	410 – 490	80
Sisson, ¹⁸ 1973	420 – 490	70
LeRoy, ¹⁹ 1973	420 – 470	50
Modi, ²⁴ 1983	420 – 480	60
Ennever, ²⁵ 1983	390 – 470	80
Carvalho, ² 1990	400 – 480	80
Carvalho, ³² 1992	400 – 480	80
Tan, ²⁹ 1992	400 – 480	80
Diane, ³¹ 1992	425 – 475	50
Carvalho, ⁶ 1998	420 – 470	50
Carvalho, ⁷ 1999	420 – 470	50
Carvalho, ⁷ 1999	400 – 500	100
Kliemann, ³⁶ 2001	420 – 480	60
Silva, ¹³ 2001	425 – 475	50
McColl, ³⁷ 2001	400 – 500	100
Rosen, ⁴⁴ 2005	410 – 490	80
Maisels, ⁴⁵ 2005	425 – 475	50
Comitê de Neonatologia – MG, ⁴⁶ 2005	400 – 500	100

O gráfico da figura 1 é relativo aos dados da tabela 2 e mostra a suposta região azul do espectro, utilizada por cada autor, na qual a bilirrubina absorve luz, com o comprimento de onda variando de 390 a 500nm.

Diferentes comprimentos de onda são observados como correspondentes à região azul do espectro. Dos 21 estudos, somente um (4,8%) afirma que a região em que a bilirrubina supostamente absorve luz tem seu valor mínimo em 390nm, região de UVA; seis (28,5%) afirmam começar em 400nm, comprimento de onda limiar entre a região de UVA e visível; dois (9,5%) em 410nm; nove (42,8%) em 420nm e três (14,3%) em 425nm.

Argumentação relativa à fototerapia da radiação visível azul

O comprimento de onda determina a cor da luz, no caso: luz azul, 455 a 492nm; luz verde, 492 a 577nm. De acordo com os autores estudados (tabela 2), a bilirrubina absorve luz entre 390 e 500nm, com um pico máximo em 460nm (luz azul); por isso convencionou-se em fototerapia a região espectral do azul para a hiperbilirrubinemia. São utilizadas lâmpadas fluorescentes brancas (luz do dia) e azuis.

A eficácia da fototerapia depende de uma série de condições:¹³

- Concentração sérica inicial de bilirrubina: quanto mais bilirrubina houver, mais eficaz é a fototerapia; para recém-nascido de concentração sérica muito baixa, a eficácia é muito pequena.
- Superfície corporal do recém-nascido: a eficácia da fototerapia é maior quanto mais pele for exposta à luz.
- Dose de irradiância (medida em mW/cm²): é uma das variáveis mais importantes na eficácia da fototerapia. Existe correlação entre o valor da irradiância e a queda da bilirrubina. Quanto maior a irradiância na faixa do azul maior é a queda da concentração de bilirrubina.
- Distância do recém-nascido à fonte luminosa: quanto mais próxima do recém-nascido estiver a fonte luminosa, mais eficaz é a fototerapia. Na relação inversa entre irradiância e distância: quanto mais próxima estiver a fonte de luz, mais irradiância atinge a pele do recém-nascido. A distância ideal depende do tipo de luz utilizada.

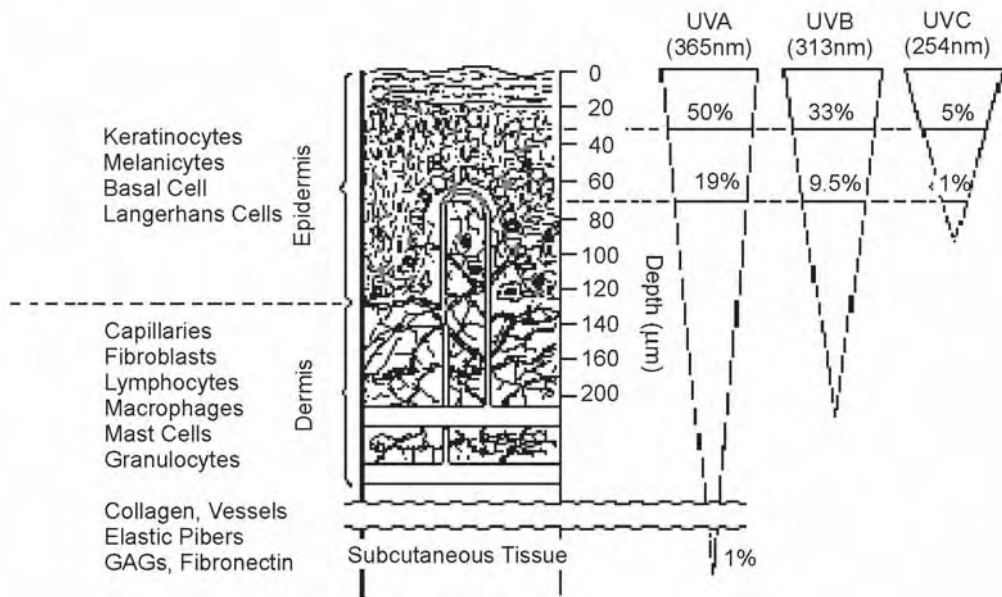


Figura 2 – Geometria de exposição da pele humana à radiação óptica, indicando camadas, tipos de células, componentes estruturais e transmitâncias percentuais de UVA, UVB e UVC.⁴

Radiação UV de lâmpadas fluorescentes e hiperbilirrubinemia neonatal

Geometria de exposição da pele

Como a radiação UV incidente na pele humana segue um dos três mecanismos, absorção, reflexão ou espalhamento, a exposição à radiação das várias camadas da pele deve ser menor do que a exposição à radiação incidente. A reflexão ocorre não somente na superfície do *stratum corneum*, mas em todas as interfaces, variando em índice de refração. O espalhamento ocorre por causa dos diferentes elementos estruturais: pêlos, glândulas sebáceas e componentes celulares. A radiação UV restante penetra em camadas mais profundas da pele. A radiação UV penetra na derme expondo uma variedade de células e de estruturas, dependendo em parte da espessura do *stratum corneum* e da epiderme. A profundidade de penetração depende do comprimento de onda⁴. A figura 2 mostra que 50% da radiação UVA é absorvida nos primeiros 30µm de profundidade e 50%

transmitido para a profundidade de 70µm; absorvendo 19% e transmitindo 31%, absorvido pela derme; chegando 1% à camada subcutânea.⁴

A figura 2 mostra que 5% da radiação UVC é absorvida nos primeiros 30µm de profundidade e 95% transmitido para a profundidade de 70µm; absorvendo menos de 1% e transmitindo 94%, absorvido pela derme; chegando à camada subcutânea.⁴

A distribuição e o tamanho de partículas de melanina desempenham papel importante na proteção de células da epiderme. As partículas de melanina têm uma distribuição dentro do *stratum corneum* e das células da epiderme, e depende do tipo de pele.⁴

Profundidade de penetração e de reflexão da radiação UV na pele humana⁴

Estudos mostram que o limite de dano da radiação sobre a pele depende do coeficiente de reflexão da pele e da profundidade de penetração da radiação⁴⁷. Os coeficientes de reflexão das

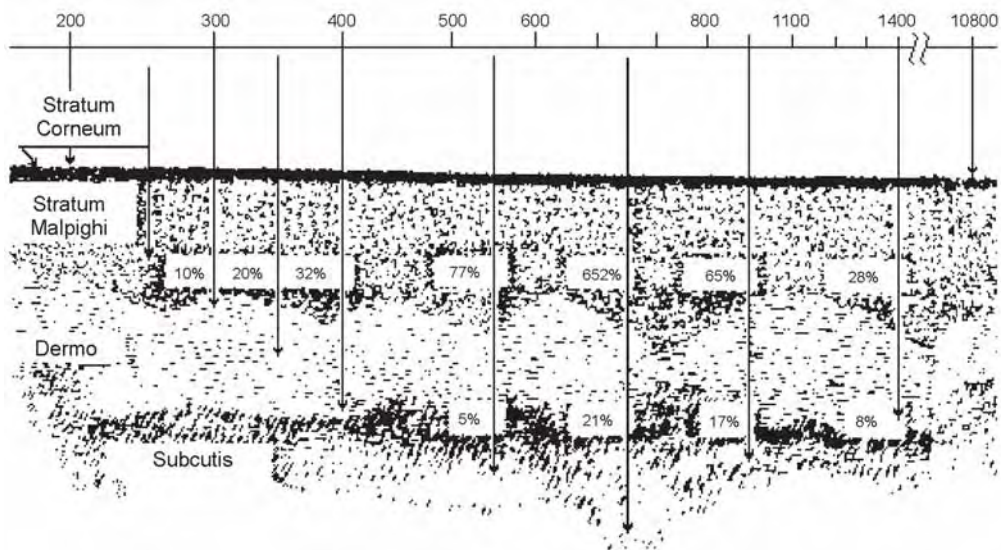


Figura 3 – Profundidade de penetração percentual de radiação óptica incidente na pele para diferentes comprimentos de onda em [nm].⁴⁷

camadas da pele determinam o total de radiação efetivamente absorvida. A reflexão da pele varia com a pigmentação e é significativa somente em relação ao espectro visível e infravermelho. A figura 3 mostra a profundidade de penetração percentual de radiação óptica incidente na pele para diferentes comprimentos de onda. A reflexão da pele em comprimento de onda menor do que 310nm (UVB) e acima de 2,5µm (IVB) é menor do que 5%.

No comprimento de onda de 350nm (UV), 10% da radiação é absorvida pela epiderme e 90% penetra e é absorvida pela derme, enquanto no comprimento de onda de 550nm (Visível), 77% da radiação é absorvida pela epiderme e 23% penetra e é absorvida pela derme. Quanto menor o comprimento de onda, maior a penetração.

O estudo experimental in vitro de FADHIL M. SALI³⁸

Um estudo relativo à exposição à luz solar foi realizado³⁸ no Oriente Médio, região onde unidades de fototerapia não são disponíveis, e comprovou a radiação solar como o meio natural e mais eficiente no tratamento de recém-nascidos ictericos.

Soluções de bilirrubina foram expostas por tempos diferentes: 0, 5, 15, 30, 45 e 75min. A intensidade da luz solar e a unidade internacional de fototerapia halógena foram constantemente monitoradas por radiômetro,³⁸ de modo que as intensidades das duas fontes permanecessem as mesmas. A figura 4 mostra o resultado dessa monitoração.

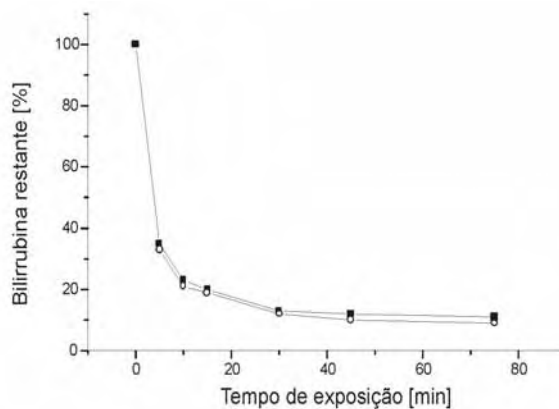


Figura 4 – Percentual de bilirrubina restante exposição à radiação óptica, para diferentes intervalos de tempo, para a luz solar (o) e para a unidade de fototerapia halógena(*).

A fonte utilizada foi uma lâmpada de fototerapia halógena, de 165 – 180W, que emite luz em um espectro próximo ao da luz solar, a uma distância de 17cm. A intensidade da luz solar e a unidade internacional de fototerapia halógena foram constantemente monitoradas,³⁸ de modo que as intensidades de luz das duas fontes permanecessem as mesmas.

A fim de obter uma taxa de exposição comparável com a taxa da luz solar, amostras de bilirrubina foram presas a aproximadamente 17cm da janela de luz da unidade de fototerapia. Esta distância é aproximadamente três vezes mais próxima (a área eficaz do feixe é 50cm²) do que a distância usual usada para fototerapia de crianças ictericas. A seleção dessa distância aproxima a intensidade da luz solar média em 12 horas em dias selecionados, nas quatro estações. A intensidade da luz da unidade de fototerapia numa distância de 50cm (1,03 x 10² W. m⁻²) era aproximadamente seis vezes mais baixa do que a de 17cm (6,08 x 10² W.m⁻²) medida no centro do feixe.

Resultados experimentais de FADHIL M. SALI³⁸

Como o espectro da luz solar possui a faixa de comprimento de onda para isomerização da bilirrubina, a radiação solar é apropriada para o tratamento de crianças ictericas, particularmente em áreas rurais, onde as unidades de fototerapia não estão disponíveis.

Embora a luz solar direta traga riscos prejudiciais do efeito UV, tais efeitos são evitados usando simplesmente materiais bloqueadores de UVB, como janelas de vidro de 3mm.

No estudo de Fadhil M. Salih, é mostrado que, sob as mesmas condições, a eficiência da luz solar na isomerização da bilirrubina coincide com a de unidade de fototerapia, usando uma solução aquosa de bilirrubina.

A eficiência da luz solar na redução da concentração de bilirrubina, como medido na densidade óptica, foi comparada com uma unidade de fototerapia usada em divisões pediátricas. A figura 5 mostra o espectro típico de absorção da bilirrubina após exposição à luz solar em diferentes intervalos de tempo. A linha pontilhada representa o espectro de absorção da bilirrubina exposto por 5min, a 50cm de distância da fonte óptica de fototerapia. A luz solar reduziu a concentração de bilirrubina significativamente (65%) nos primeiros 5min, seguido por uma redução ainda mais baixa da bilirrubina (85%), que foi isomerizada após 30min. Um aumento adicional no tempo de exposição causou uma mudança muito pequena na concentração. Dois picos são vistos facilmente em 291 e 325nm e a altura destes picos aumentados com o crescente tempo de exposição.

A explicação para a diferença na eficiência observada está nas características físicas das duas fontes, as distribuições de energia por comprimento de onda são diferentes.

A luz solar é uma luz quente e a luz de unidade de fototerapia é uma luz fria. Isso impõe calor acima do efeito (temperatura aumentada para 39.9° C), o que influencia o processo fotolítico.

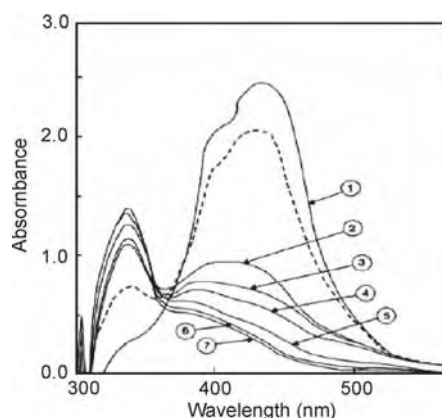


Figura 5 – Espectro típico de absorção da bilirrubina exposta à luz solar soluções para 0 (1), 5 (2), 15 (3), 15 (4), 30 (5), 45 (6) e 75 (7) min.

O comportamento da bilirrubina em relação às radiações UV e visível, analisado a partir do estudo experimental de Fadhil M. Salih, permite observar um percentual crescente de absorção de radiação UV com o tempo de exposição.³⁸

Discussão e comentários

Este estudo⁴⁸ aborda a participação da radiação UV residual de lâmpadas fluorescentes no mecanismo da fototerapia neonatal no tratamento da hiperbilirrubinemia, em três aspectos:

a) O primeiro: circunstancial, documentado na literatura médica e técnica-científica no fato físico da radiação UV preexistir nos casos estudados: natural (solar) e artificial. Cerca de 40 estudos, representativos da literatura médica neonatal, considerados neste estudo⁴⁸, apresentam um dado técnico comum, sem justificativa aparente: preferência pela lâmpada fluorescente como fonte óptica, e em alguns casos, pela lâmpada halógena. A diretriz da INIRC²⁸ é um documento técnico de recomendação internacional que afirma a existência da emissão de radiação UV nas lâmpadas fluorescentes. Medidas de radiação UV foram realizadas em lâmpadas fluorescentes.^{27,30,33,41} A lâmpada halógena produz radiação ultravioleta juntamente com a luz branca visível gerada, pelo fato de o filamento atingir 3.000°C. A radiação ultravioleta artificial é produzida por qualquer material aquecido a temperaturas excedendo⁴ 2.500K. As lâmpadas halógenas de tungstênio de alta temperatura emitem quantidades significativas de UVB.⁴ Para os diversos estudos, o gráfico da figura 1 mostra o espectro em que a bilirrubina absorve luz, com o comprimento de onda variando de 390 a 500nm. O espectro de absorção da bilirrubina é citado como 380 a 500nm², em que a radiação UV está explicitada. O limite do espectro da radiação

visível é 400nm, abaixo deste comprimento de onda ocorre UVA.

b) O segundo: da acurácia (*accuracy*) conceito científico físico relativo à propriedade da medida de grandeza física obtida por instrumentos e processos estar isento de erro sistemático. Lâmpadas fluorescentes e halógenas emitem na região de ultravioleta.^{27,28,30,33,41} No caso de uso do LED⁴⁴, sem UV, o valor da irradiância é aproximadamente o dobro para o mesmo efeito da fonte fluorescente, o que permite inferir compensação relativa à ausência da radiação UV.

c) O terceiro: do conhecimento científico recente sobre as propriedades ópticas do comportamento dos tecidos biológicos no espectro das radiações UV, visível e infra-vermelha¹², em que estão identificados mecanismos de espalhamento no interior dos tecidos. A radiação UV penetra em camadas mais profundas da pele, na derme, expondo uma variedade de células e de estruturas celulares, dependendo em parte da espessura do *stratum corneum* e da epiderme. No processo de absorção da radiação UV pelo tecido, ocorre transferência de energia para o meio com elevação de temperatura, que assegura o mecanismo de fotoisomerização da bilirrubina em que participa a luz azul. No estudo de Fadhil M. Salih³⁸, a curva da figura 5 mostra elevada presença de UVA (320-400nm).

Conclusão

A argumentação da radiação UV aponta que esta radiação ao participar dos processos de espalhamento Mie e Rayleigh na derme transfere energia para o meio, sob a forma de calor, resultante de transformações de comprimento de onda por ação dos componentes estruturais do tecido biológico.^{11,12,49}

A interpretação deste estudo⁴⁸ da participação da radiação UV não contraria a interpretação dos efeitos terapêuticos obtidos em todos os estudos médico citados. Durante quase 50 anos do uso da fototerapia no tratamento da hiperbilirrubinemia, a ênfase tem sido a aplicação de unidades de fototerapia de luz fluorescente ou halógena, experiência médica que tem dado certo. Este estudo⁴⁸ focaliza, porém, a interpretação do mecanismo físico envolvido, contrariando a interpretação da ação exclusiva da luz visível, azul ou verde na quebra de ligações químicas da bilirrubina, pela não consideração do erro

sistemático relativo à presença da radiação UV participando do mecanismo.

O resultado experimental do estudo de Fadhil M. Salih³⁸ mostra elevada presença de UVA (320-400nm).

A luz visível azul, somente, não assegura condições de elevação de temperatura para o mecanismo da isomerização. A radiação UV, ignorada na totalidade dos estudos, é responsável com seu elevado nível de energia pelas condições favoráveis ao mecanismo da fotoisomerização da bilirrubina disparado pela luz azul.



Referências

- 1 RAMOS, J. L., *Ictericia do recém-nascido: aspectos atuais*. Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba, Vol. 4, nrs. 1-2, pp 17-30, 2002.
- 2 CARVALHO M., *Fototerapia: nem tudo que ilumina trata*. 133p. Dissertação de Mestrado em Medicina, FIOCRUZ, 1990. <http://www.bibiff.cict.fiocruz.br/teses.htm>, consulta em 23/03/06.
- 3 IRPA, *Review of concepts, quantities, units and terminology for non-ionizing Radiation Protection*. Health Physics, vol. 49, nr. 6, December 1985.
- 4 EHC-160, *Environmental Health Criteria 160 - Ultraviolet Radiation*. International Program on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1994.
- 5 CREMER, R. J., PERRYMAN, P. W., *Influence of light on the hyperbilirubinemia of infants*. Biochemistry Department, General Hospital, Rochford, Vol. 1, nr. 7030, pp 1094-1096, 1958.
- 6 CARVALHO M., *Controvérsias em icterícia neonatal*. XVI Congresso Brasileiro de Neonatologia – Salvador – 21 a 26/11/1998.
- 7 CARVALHO M., LOPES, J. M., NETTO, D. B., *Fototerapia integral de alta intensidade para o tratamento da icterícia do recém-nascido*. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, Vol. 15, nr. 3, pp 109-113, 1999.
- 8 He-Ne LASER, *Model 155 Helium-Neon LASER, Spectra-Physics instruction manual*, edição E/155, 1977.
- 9 UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE DO SUL. *O Sol e seus efeitos*. Instituto de Bio-ciências, Departamento de Biofísica [online]. 1999. www.fismed.ufrgs.com.br/sol_efeitos.htm, consulta em 22/04/2006.
- 10 POIRIER, G., *Human Skin Modelling and Rendering*. 2003. Tese (Master of Mathematics) – University of Waterloo, 2003.
- 11 KOWALSKI, W.J., *Design and optimization of UVGI air disinfection systems*. Doctoral thesis, The Pennsylvania State University, August 2001.
- 12 JACQUES, S. L., *Origins of tissue optical properties in the UVA, visible, and NIR regions*. Advances in Optical Imaging and Photon Migration, supplied by The British Library – “The world’s knowledge”, 1996.
- 13 SILVA, F. M. D., IDERIHA, E. T., NETTO, E. J., *Desenvolvimento de sistema óptico para unidade de fototerapia neonatal*. Dep. de Eng. Elétrica e Informática Ind., CEFET – PR, 2001.
- 14 COSTA FERREIRA, H., BARBIERI, D., BEREZIN, A., LARRUBIA, M.N., *A Super-iluminação na hiperbilirrubinemia do recém-nascido*. Jornal de Pediatria, Vol. 25, 1960.
- 15 BALLOWITZ, L., AVERY, M. E., *Spectral reflectance of the skin*. Department of Pediatrics, Free University of Berlin. Biol. Neonate 15, pp 348-360, 1970.
- 16 SANDRA. L. W., *Phototherapy in Hyperbilirubinemia*. American Journal of Nursery, Vol. 71, Nr. 7, pp 1397-1399, 1971.
- 17 SISSON, T. R. C., KENDALL, N., GLAUSER, S. C., KNUTSON, S., BUNYAVIROCH, E., *Phototherapy of jaundice in newborn infants I – ABO blood group incompatibility*. The Journal of Pediatrics, Vol. 79, nr. 6, pp 904-910, December 1971.
- 18 SISSON, T. R. C., KENDALL, N., GLAUSER, S. C., KNUTSON, S., BUNYAVIROCH, E., *Phototherapy of jaundice in newborn infants II – effect of various light intensities*. The Journal of Pediatrics, Vol. 81, nr. 61, pp 35-38, July 1972.
- 19 LEROY, C.M., MARCELLO, E., DAVID, S.G., ROBERT, R.C., ROBERT, V.K., *Phototherapy for neonatal hyperbilirubinemia – a dose: response relationship*. Fetal and Neonatal Medicine, Vol.83, nr. 4, pp. 658-662, 1973

- 20 SCHREINER, R. L., HANNEMANN, R. E., DEWITT, D. P., MOOREHEAD, H. C., *Relationship of skin reflectance and serum bilirubin: full term caucasian infants*. Human Biology, Vol. 51, nr. 1, pp 31-40, February 1979.
- 21 ROX ANDERSON, R., *The Optics of Human Skin*. The Journal of Investigative Dermatology, Vol. 77, pp 13-19, 1981.
- 22 WIESE, G., BALLOWITZ, L., *Mathematical description of the temporal changes in serum bilirubin concentration during phototherapy in newborn infants*. Biol. Neonate, Vol. 42, pp 222-227, 1982.
- 23 MCDONAGH, A. F., PALMA, L. A., *Phototherapy for neonatal jaundice – configurational isomers of bilirubin*. Journal American Chemical Society, Vol. 104, nr. 24, Department of Medicine and The Liver Center, University of California, 1982.
- 24 MODI, N., KEAY, A. J., *Phototherapy for neonatal hyperbilirubinemia: the importance of dose*. Western General Hospital, Archives of Disease in Childhood, Vol. 58, pp 406-409, 1983.
- 25 ENNEVER, J. F., MCDONAGH, A. F., SPECK, W. T., *Phototherapy for neonatal jaundice: optimal wavelenghts of light*. University School of Medicine, Jornal of Pediatrics 103:295, 1983.
- 26 MCDONAGH, A. F., *Light effects on transport and excretion of bilirubin in newborns*. National Institutes of Health, The Liver Center and Dep. of Medicine, University of California, 1985.
- 27 WHILLOCK, M., CLARCK, I.E., MCKINLAY, A.F., TODD, C.D., MUNDY, S.J., *Ultraviolet radiation levels associated with the use of fluorescent general lighting, UV-A and UV-B lamps in the workplace and home*. NRPB – R221, 1988.
- 28 IRPA/INIRC, *Guidelines on fluorescent lighting and malignant melanoma*. Health Physics, Vol. 58, nr.1, pp 111–112, January 1990.
- 29 TAN, K.L., LIM, G. C., BOEY, K. W., *Efficacy of “high intensity” and “standard” daylight phototherapy for non-haemolytic hyperbilirubinemia*. Departments of Pediatrics, National University of Singapore. Acta Pediatrics, Vol. 81, pp 870-874, 1992.
- 30 WALTER, S. D., MARRET, L. D., SHANNON, H. S., FROM, L., HERTZMAN, C., *The association of cutaneous malignant melanoma and fluorescent light exposure*. American Journal of Epidemiology, Vol. 135, nr. 7, pp 749-762, 1992.
- 31 DIANE, W., JAMES, G.K., *Pediatrics East, Memphis Children’s Clinic, Pediatric Association. A New Light on Jaudice*, Clinical Pediatrics, 353-356, 1992.
- 32 CARVALHO M., LINS, M. F. C., LOPES, J. M. A., *Lâmpadas fluorescentes para fototerapia*. Jornal de Pediatria, Vol. 68 (5/6), 1992.
- 33 PEARSON, A., *UVR from fluorescent lamps*. Radiological Protection Bull., nr. 200, April 1998.
- 34 ANGELOPOULOU, E., *The reflectance spectrum of human skin*. Dep. of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, 1999. <http://www.grip.cis.uppen.edu>, consulta em 27/01/2006.
- 35 NIKI, L., Taina, H., Maija-Liisa, L., Aino, A., Marja-Leena, L. Ursula, T., *Bright light exposure of large skin area does not affect melatonin on bilirubin levels in humans*. Biol. Psychiatry, Vol. 48, 1098-1104, 2000.
- 36 KLIEMANN, R., NOHAMA, P., *Avaliação dos equipamentos de fototerapia no tratamento dahiperbilirubinemia neonatal em maternidades de Curitiba*. CEFET – PR, 2001.
- 37 McCOLL, S. L., VEITCH, J. A., *Full-spectrum fluorescent lighting: a review of its effects on physiology and health*. National Research Council Canada, Psychological Medicine, Vol. 3, nr.6, pp 949-964, August 2001. <http://nrc.ca/irc/ircpubs>, consulta em 14/06/2005.
- 38 SALIH. F. M., *Can sunlight replace phototherapy units in the treatment of neonatal jaundice?An in vitro study*. Department of Clinical and Biomedical Physics, Sultan Qaboos University.Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine, Vol. 17, pp 272-277, 2001.
- 39 SU, Y., WANG, W., XU, K., JIANG, C., *The optical properties of skin. Optics in health care and biomedical optics: diagnostics and treatment*. “Proceedings of SPIE. Vol. 4916, supplied by The British Library – “The world’s knowledge”, 2002.
- 40 OZEN, S., Cerezci, O., Çomlekçi, S., Demir, Z., *Heat effect analysis of microwave exposed skin by using a multilayer human skin model*. [http://www.telecomlab.gr/2002/oct/rhodes/pap3rs/N%20123%20\(p875%20-%20p881\).pdf](http://www.telecomlab.gr/2002/oct/rhodes/pap3rs/N%20123%20(p875%20-%20p881).pdf), consulta em 14/12/2004.
- 41 MARTINS, O. L., GOUVEIA, J. C., *Avaliação do risco de exposição ultravioleta em um ambiente ocupacional – estudo de caso*. METROLOGIA, 2003.
- 42 DAL MORO, A.N., SILVESTRI, K., DA SILVA, R., *Avaliação clínica da icterícia: correlação com níveis séricos de bilirubinas*. Arquivos Catarinenses de Medicina, 2004.
- 43 CARVALHO M., VIEIRA, A.A., LIMA, C.L., MOREIRA, M.E., *O uso da fototerapia em recém-nascidos: avaliação da prática clínica*. Revista Brasileira de Saúde Materna Infantil, Vol. 4, pp 359-366, 2004.
- 44 ROSEN, H., ROSEN, A., ROSEN, D., ONARAL, B., HIATT, M., *Use of a light emitting diode(LED) array for bilirubin phototransformation*. St. Peter’s University, May 2005.
- 45 MAISELS, M. J., WATCHKO, J. F., *Treatment of jaundice in low birthweight infants*. Arch. Dis. Child. Fetal Neonatal. Ed. 2003, 88, pp 459-463. <http://fn.bmjournals.com/cgi/reprint/88/6/F459>, consulta em 18/12/2005.
- 46 COMITÉ DE NEONATOLOGIA – MG., *Icterícia neonatal*. Textos científicos Sociedade Mineira de Pediatria, 2005. <http://www.smp.org.br>, consulta em 17/03/05.
- 47 EHC-23, *Environmental Health Criteria 23 - Lasers And Optical Radiation*. International Program on Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1982.
- 48 ALVES, P. M., *Análise da Contribuição da Radiação UV no Tratamento da Icterícia do Recém-Nato*. Dissertação de mestrado, IME, 2006.
- 49 FONSECA, R.C.C., *Contribuição para dosimetria UV em bronzamento artificial*. Dissertação de mestrado, IME, 2005.