

## Sobre el ángulo sólido y las fuentes equivalentes

Tony Viloría<sup>1,\*</sup>, Terenzio Soldovieri<sup>1</sup>, Isabel Bong<sup>2</sup> y Daniel Palacios<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Ciencias Cuánticas Aplicadas (LCCA), Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Zulia (LUZ). Maracaibo, Venezuela.

<sup>2</sup>Postgrado de Física Médica, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Miranda, Venezuela.

<sup>3</sup>Laboratorio de Física Nuclear, Universidad Simón Bolívar (USB). Sartenejas, Venezuela.

Recibido: 07-01-09 Aceptado 06-11-09

### Resumen

A partir del promedio de la expresión analítica aproximada del ángulo sólido subtendido por un detector circular con respecto a una fuente puntual no-axial, presentada en 1986 (12), son obtenidas expresiones analíticas para el ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente circular coaxial y el subtendido por un detector del mismo tipo con respecto a una fuente cilíndrica coaxial. El procedimiento utilizado permite introducir el concepto de *fente equivalente*.

**Palabras clave:** ángulo sólido, fuente equivalente, sistema espectrométrico.

## On the solid angle and the equivalent sources

### Abstract

From the average of the approximated analytical expression of the average solid angle subtended by a circular detector with respect to no-axial source point, presented in 1986 (12), analytical expressions are obtained for the average solid angle subtended by a circular detector with respect to a coaxial circular source and the one subtended by an equal detector with respect to a coaxial cylindrical source. The used procedure allows to introduce the concept of equivalent source.

**Key words:** solid angle, equivalent source, spectrometric system.

### Introducción

Hasta la fecha se han realizado numerosos trabajos con el objetivo de calcular analítica y numéricamente (usando el método de Monte Carlo) el valor del ángulo sólido promedio subtendido por el detector con respecto a la fuente, para sistemas detector-fuente con diferentes geometrías. Ejemplos concretos los encontramos en las referencias (1-8) para detectores circulares y fuentes circulares y cilíndricas, en (9, 10)

para detectores tipo pozo y fuentes puntuales y circulares, y en (11) para detectores cilíndricos y fuentes rectangulares.

En 1986 (12) fueron publicadas las siguientes expresiones analíticas del ángulo sólido promedio:

1. Para un sistema detector circular-fuente puntual (SCP) no-axial,

$$\tilde{\Omega}_p(u, w) = 2\pi \left[ (1 + w^2)^{-1/2} - (1 + u^2 + w^2)^{-1/2} \right] \quad [1]$$

\* Autor para la correspondencia: tviloría63@yahoo.es

donde  $u = r_d / y$  y  $w = R / y$ , con  $y$  la distancia entre la fuente y el plano del detector,  $r_d$  el radio del detector y  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$  la distancia entre la fuente puntual y el eje del detector. El subíndice  $P$  indica que es para una fuente puntual y  $\sim$  indica que pertenece a las publicadas en (12).

2. Para un sistema detector circular-fuente circular (SCC) coaxial,

$$\tilde{\Omega}_C(u, v) = \frac{8\pi}{v^2} \left[ (4 + v^2)^{1/2} - 2 - (4 + v^2 + 4u^2)^{1/2} + 2(1 + u^2)^{1/2} \right] [2]$$

donde  $v = 2r_f / y$ , con  $r_f$  el radio de la fuente y  $y$  es la distancia entre el plano del detector y el plano de la fuente. El subíndice  $C$  indica que es para una fuente circular.

3. Para un sistema detector circular-fuente cilíndrica (SCCil) coaxial,

$$\tilde{\Omega}_{Cil}(u, v, w') = \frac{2\pi}{3c^2(a-1)} [A^3 - B^3 - C^3 - D^3 + E^3 + F^3 - G] [3]$$

donde:

$$A = \sqrt{(a-2)^2 + c^2 + d^2}, \quad B = \sqrt{A^2 - c^2}$$

$$C = \sqrt{A^2 - d^2}, \quad D = \sqrt{a^2 + c^2 + d^2},$$

$$E = \sqrt{D^2 - c^2}, \quad F = \sqrt{D^2 - d^2},$$

$$G = 2(a-1)(a^2 - 2a + 4)$$

$$\text{con } a = (1+w')b, \quad b = 2 / (2+w'), \\ c = \frac{1}{2}vb, \quad d = bu.$$

Aquí  $w' = h_f / y$ ,  $y$  es la distancia entre el plano que contiene la base de la fuente cilíndrica más cercana al detector y

el plano del detector (el eje del detector pasa por los centros de ambas bases de la fuente),  $h_f$  es la altura de la fuente. El subíndice  $Cil$  indica que es para una fuente cilíndrica.

La expresión [1] es, en realidad, una aproximación que resulta de despreciar el término  $2\rho R \cos(\varphi_o - \varphi)$  en la integral exacta para un SCP no-axial cuya fuente está situada a una distancia  $y$  del plano del detector y  $R$  con respecto a su eje dada por (ver referencias (13, 14) para detalles y justificación de la aproximación),

$$\Omega_{P_{exacta}} = y \int_0^{2\pi} \int_0^{r_d} \frac{\rho d\rho d\varphi}{[\rho^2 + R^2 + y^2 - 2\rho R \cos(\varphi_o - \varphi)]^{3/2}} [4]$$

lo cual, ciertamente, introduce anomalías (14) en la solución.

Dados un SCC y un SCCil (ambos coaxiales) y partiendo de la expresión [1], en este trabajo se obtendrán expresiones analíticas para el ángulo sólido promedio subtendido en dichos sistemas. Se demuestra además la existencia de fuentes que, al cumplir con ciertas condiciones, comparten el mismo ángulo sólido que la fuente original. A estas fuentes las denominaremos *fuentes equivalentes*.

La existencia de las fuentes equivalentes permitirá simplificar los cálculos mediante la sustitución de la fuente a estudiar por su fuente equivalente de menor dimensión, transformando el sistema a otro con geometría más simple.

Para darle sustento a todo lo anterior, los resultados serán comparados con las expresiones [2] y [3] que fueron obtenidas en 1986 (12) usando un método distinto al aquí presentado.

## Equivalencia entre una fuente anular y una puntual

Para calcular el ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente anular de radio  $r_f$  coaxial, situada a una distancia  $y$  del plano del mismo, la fuente será subdividida en infinitas fuentes puntuales como muestra la figura 1a.

Ahora, el ángulo sólido promedio para la fuente anular  $\Omega_A$  vendrá dado por el promedio de los ángulos sólidos de las fuentes puntuales  $\tilde{\Omega}_p$  sobre la circunferencia descrita por dicha fuente. Por lo tanto,

$$\Omega_A = \frac{1}{2\pi r_f} \int_C \tilde{\Omega}_p ds = \frac{1}{2\pi r_f} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \tilde{\Omega}_p [x(\xi), z(\xi)] \left[ \left( \frac{dx(\xi)}{d\xi} \right)^2 + \left( \frac{dz(\xi)}{d\xi} \right)^2 \right]^{1/2} d\xi \quad [5]$$

(aquí  $s$  es la longitud del camino) sobre el camino  $C$  dado por,

$$\vec{r} = x(\xi)\hat{e}_x + z(\xi)\hat{e}_z = r_f \cos(\xi)\hat{e}_x + r_f \sin(\xi)\hat{e}_z$$

que se ha parametrizado mediante  $\xi$ , con  $\xi \in [0, 2\pi]$ . Ahora, al sustituir la expresión [1] en la [5], resulta lo siguiente,

$$\Omega_A = 2\pi y \left[ (y^2 + r_f^2)^{-1/2} - (y^2 + r_f^2 + r_d^2)^{-1/2} \right] [6]$$

expresión que es idéntica a la [1], para una fuente puntual ubicada a una distancia  $R = r_f$  del eje del detector, por lo tanto,

$$\Omega_A = \tilde{\Omega}_p \quad [7]$$

que indica la equivalencia entre la fuente puntual y la fuente anular bajo las condiciones descritas.

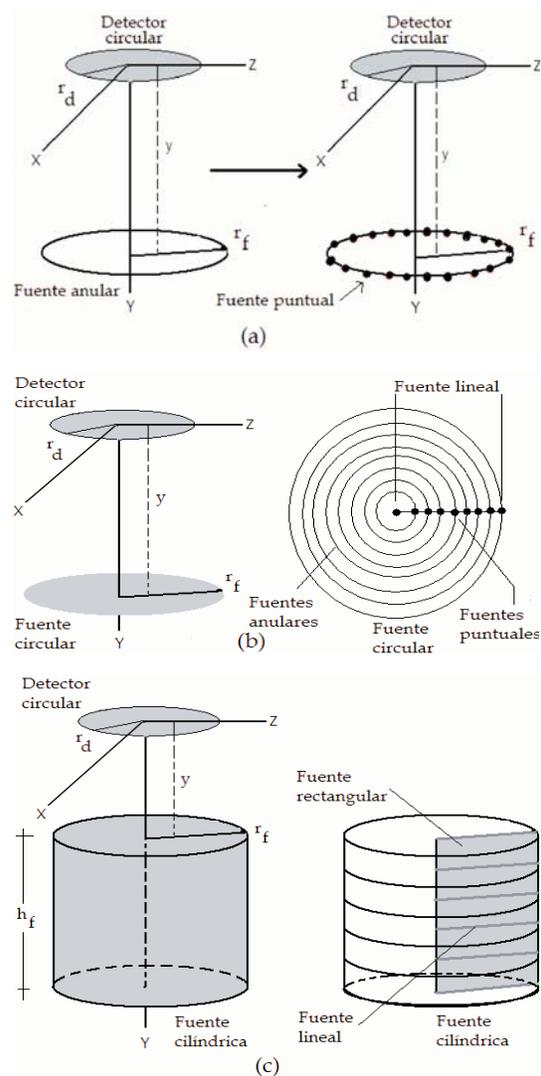


Figura 1. (a) Sistema detector circular y fuente anular (a la izquierda) y anular subdividida en infinitas fuentes puntuales (a la derecha). (b) SCC coaxial (a la izquierda) y fuente circular subdividida en infinitas fuentes anulares, que a la vez equivalen a fuentes puntuales que, en conjunto, configuran una fuente lineal (a la derecha). (c) SCC coaxial (a la izquierda) y fuente cilíndrica subdividida en infinitas fuentes circulares que, a la vez, resulta en infinitas fuentes lineales, formando así una fuente rectangular (a la derecha).

**Ángulo sólido promedio  
para un SCC coaxial.  
Equivalencia entre una fuente  
circular y una fuente lineal**

Para calcular el ángulo sólido promedio  $\Omega_C$  subtendido por el detector con respecto a la fuente en un SCC coaxial, cuya fuente está situada a una distancia  $y$  del plano del mismo y con radio  $r_f$ , la fuente puede ser subdividida en infinitas fuentes anulares concéntricas (figura 1b). Además, ya que debido a lo expresado en la sección 2 cada fuente anular equivale a una fuente puntual, entonces podemos construir una fuente lineal a lo largo de todo el radio con el conjunto de todas estas fuentes puntuales. A su ángulo sólido promedio lo denotaremos por  $\Omega_L$ . Todo lo anterior evidencia la equivalencia entre una fuente circular y una lineal, bajo las condiciones descritas. Por lo tanto,

$$\Omega_C = \Omega_L \quad [8]$$

Empleando un procedimiento análogo al llevado a cabo en la sección anterior, pero partiendo de,

$$\Omega_L = \frac{1}{r_f} \int_C \tilde{\Omega}_P ds \quad [9]$$

el valor de  $\Omega_L$ , a lo largo del camino C recto  $\vec{r} = z(\xi)\hat{e}_z = \xi\hat{e}_z$  (donde  $\xi \in [0, r_f]$ ) que contiene a la fuente y parametrizado mediante  $\xi$ , vendrá dado por,

$$\Omega_L = \frac{4\pi}{v} \ln \left[ \sqrt{1+u^2} \frac{v + \sqrt{4+v^2}}{v + \sqrt{4+4u^2+v^2}} \right] \quad [10]$$

donde  $u = r_d / y$  y  $v = 2r_f / y$ , que tiene la misma forma a la dada en 2006 (15) y en 2008 (14) por los mismos autores, pero para una fuente lineal de longitud  $L$  simétrica con respecto al eje del detector y paralela al plano que lo contiene.

Para el presente caso  $L = 2r_f$  y si denotamos con  $\Omega'_L$  el ángulo sólido subtendido por el detector con respecto a dicha fuente lineal, entonces:

$$\Omega'_L = \Omega_L \quad [11]$$

Lo anterior representa un resultado que deberíamos esperar ya que la representación gráfica (figura 2a) de la expresión [1] con respecto a  $x$  y  $z$  es simétrica, permitiendo concluir además que,

$$\Omega_C = \Omega'_L \quad [12]$$

De todo lo anterior, se puede escribir que,

$$\Omega_C = \frac{4\pi}{v} \ln \left[ \sqrt{1+u^2} \frac{v + \sqrt{4+v^2}}{v + \sqrt{4+4u^2+v^2}} \right] \quad [13]$$

**Ángulo sólido promedio  
para un SCCil coaxial.  
Equivalencia entre una fuente  
cilíndrica y una fuente  
rectangular**

Por último, en esta sección será calculado el ángulo sólido promedio  $\Omega_{Cil}$  subtendido por el detector con respecto a la fuente para un SCCil coaxial de radio  $r_f$  y altura  $h_f$ , estando la cara superior de la fuente situada a una distancia  $y$  del plano del detector como muestra la figura 1c.

La fuente cilíndrica puede ser subdividida en infinitas fuentes circulares paralelas y concéntricas. Sin embargo, según [8] cada fuente circular equivale a una fuente lineal a lo largo de todo su radio, entonces podemos construir una fuente rectangular con el conjunto de todas estas fuentes lineales, cuyo ángulo sólido promedio denotaremos por  $\Omega_R$ , como se muestra en la figura 1c. Todo esto conduce a la siguiente conclusión,

$$\Omega_{Cil} = \Omega_R \quad [14]$$

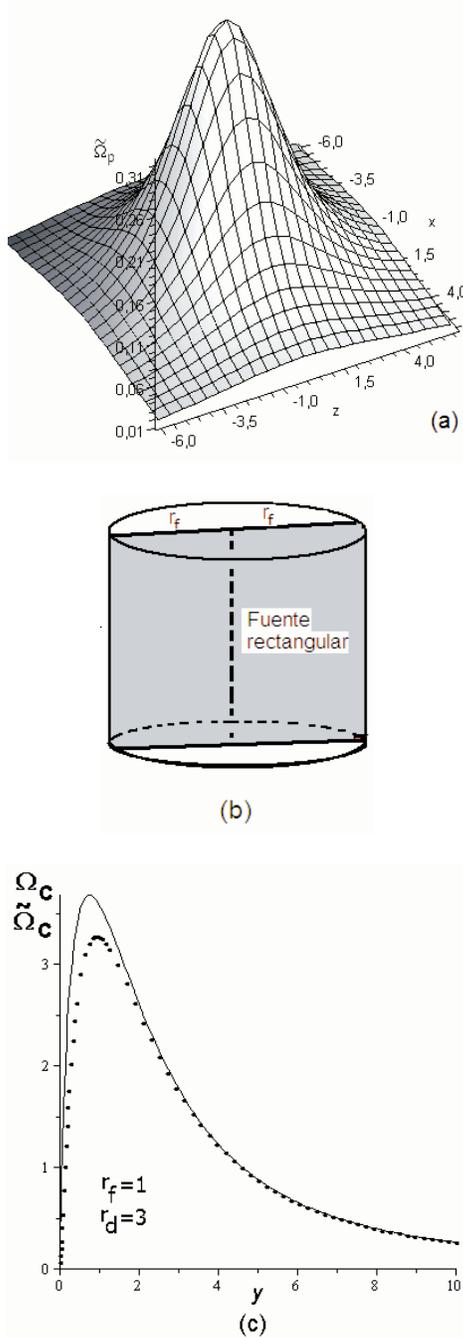


Figura 2. Representación gráfica de la expresión (1). (b) Otra fuente rectangular equivalente a la fuente cilíndrica. (c) Gráfica de  $\Omega_C$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_C$  (línea punteada) vs  $y$  para un SCC coaxial.

Se comenzará ahora calculando  $\Omega_R$ . La expresión [10] para cualquier distancia entre el plano del detector y la fuente puede ser escrita como sigue,

$$\Omega_L = \frac{2\pi y}{r_f} \ln \left[ \frac{\sqrt{y^2 + r_d^2}}{r_f + \sqrt{y^2 + r_d^2}} \frac{r_f + \sqrt{y^2 + r_f^2}}{r_f + \sqrt{y^2 + r_d^2 + r_f^2}} \right] \quad [15]$$

Para calcular el ángulo sólido promedio de esta fuente rectangular se sigue un procedimiento análogo al descrito en las secciones 2 y 3, pero partiendo de la integral,

$$\Omega_R = \frac{1}{h_f} \int_C \Omega_L ds \quad [16]$$

sobre el camino  $C$  dado por  $\vec{r} = y(\xi)\hat{e}_y = \xi\hat{e}_y$ ,  $\xi \in [y, y+h_f]$ , que es un camino a lo largo del eje  $y$ , parametrizado mediante  $\xi$ . Al sustituir la expresión [15] en la [16], resulta lo siguiente:

$$\Omega_R = \frac{\pi}{w'}(B + E - G - A) - \frac{\pi}{w'v} \ln \left[ \left( \frac{A^2}{K} \right)^K \left( \frac{D}{B^2} \right)^D \left( \frac{F}{E^2} \right)^F G^2 \right] \quad [17]$$

donde,

$$\begin{aligned} A &= \frac{v}{2} + \sqrt{C + u^2} & B &= \frac{v}{2} + \sqrt{C} \\ C &= (w' + 1)^2 + \frac{v^2}{4} & D &= C + \frac{v^2}{4} \\ E &= \frac{v}{2} + \sqrt{F + \frac{v^2}{4}} & F &= 1 + u^2 \end{aligned}$$

con  $u = r_d / y$ ,  $v = 2r_f / y$ ,  $w' = h_f / y$ .

Ahora bien, debido al resultado [14], la expresión [17] debe ser igual al ángulo sólido promedio de la fuente cilíndrica, por lo tanto,

$$\Omega_{Cu} = \frac{\pi}{w'}(B + E - G - A) - \frac{\pi}{w'v} \ln \left[ \left( \frac{A^2}{K} \right)^K \left( \frac{D}{B^2} \right)^D \left( \frac{F}{E^2} \right)^F G^2 \right] \quad [18]$$

En la expresión anterior, al hacer tender  $h_f$  a cero (esto equivale a  $w' \rightarrow 0$ ), se obtiene la expresión [13] como debería esperarse, siendo esto un indicador de que el presente enfoque es correcto.

Por otro lado, debido al resultado [11], podemos escribir también que,

$$\Omega_{Cu} = \Omega'_R \quad [19]$$

donde  $\Omega'_R$  es el ángulo sólido subtendido por el detector sobre una fuente rectangular como la que se muestra en la figura 2b. Además, de los resultados [14] y [19] también podemos escribir lo siguiente,

$$\Omega'_R = \Omega_R \quad [20]$$

### Análisis y conclusiones

Para validar el procedimiento seguido en el presente trabajo, los resultados del mismo fueron comparados con los correspondientes obtenidos en 1986 (12).

Con respecto al caso de un SCC coaxial, la figura 3a muestra una representación gráfica de nuestro resultado [13] y de la expresión [2] pudiéndose notar que ambas soluciones coinciden cuando  $v \rightarrow 0$ , mientras que para valores crecientes de  $v$  se nota una divergencia entre dichas soluciones. Observamos también que esta divergencia es sensible al tamaño de la fuente.

Esta zona de divergencia se aprecia en la figura 3b. En la figura se puede notar que mientras  $v$  crece, la solución [13] presentada en este trabajo se acerca con mayor lentitud a cero que la correspondiente [2] publicada en (12).

La coincidencia entre ambas soluciones se da para valores de  $u \lesssim 1$  ( $r_f \lesssim \frac{1}{2} y$ ) de la misma manera como se pudo notar en la figura 3a.

Esta sensibilidad es explicable mediante el término  $2\rho R \cos(\varphi_o - \varphi)$  que debe ser despreciado del integrando de [4] para poder obtener [1] que es la expresión base para los cálculos realizados en el presente trabajo. El criterio usado para despreciar dicho término es que tanto  $\rho$  como  $R$  sean pequeños, siendo así su producto aún menor. La cantidad  $R$  está relacionada con el radio de la fuente en las expresiones [13] y [18], por lo tanto es de esperarse que dichas expresiones sean sensibles a sus cambios.

De la discrepancia entre ambas soluciones mostrada en la figura 3b, resulta la siguiente interrogante: ¿Cuál de las dos soluciones es más favorable? La respuesta a esta pregunta es posible encontrarla a partir de la figura 2c. Debería esperarse que para  $y \rightarrow 0$ , el correspondiente ángulo sólido debería tender a  $2\pi$ . Ninguna de las dos soluciones logra esto, pero la presentada en este trabajo es más favorable ya que si se extrapola desde una posición cercana al máximo resulta que la tendencia es más cercana a  $2\pi$  que la dada en (12). La solución presentada aquí no logra esto debido a que ha heredado las anomalías (antes referenciadas) de la expresión [1], por ser obtenida a partir de ésta.

Ahora, con respecto al caso de un SCC coaxial, las figuras 4a, 4b y 5 representan una comparación entre las expresiones [3] dada en (12) y la [18] resultado de este trabajo. En las figuras 4a y 4b se puede observar un comportamiento análogo con respecto a  $u$  y  $v$  al mostrado en las figuras 3a y 3b para un SCC coaxial, lo cual era de esperarse pues la expresión [18] se obtiene de promediar la expresión [13]; por lo tanto, valen aquí las mismas consideraciones. La figura 5 muestra una coincidencia casi perfecta entre ambas soluciones, indicando la débil

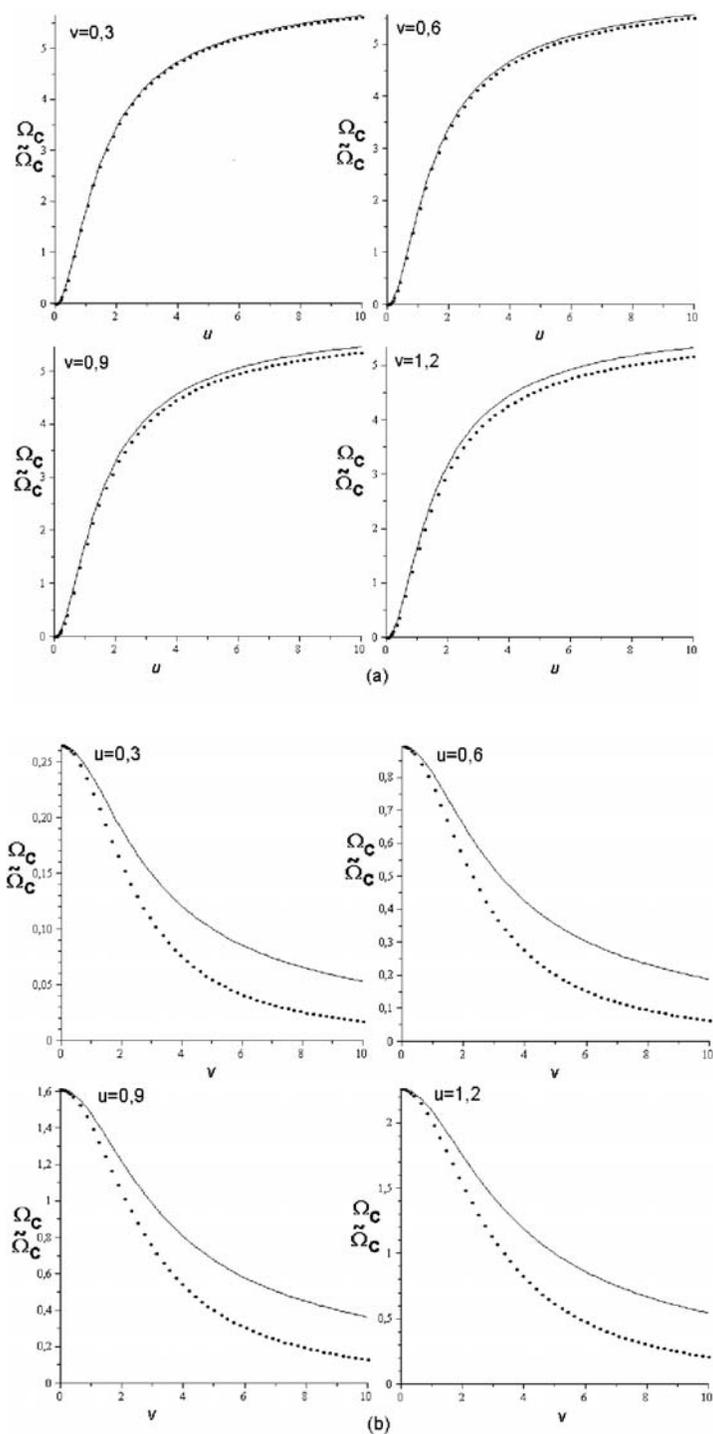


Figura 3. a) Ángulo sólido promedio  $\Omega_C$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_C$  (línea punteada) para un SCC coaxial vs  $u$  para distintas  $v$ . (b) Ángulo sólido promedio  $\Omega_C$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_C$  (línea punteada) para un SCC coaxial vs  $v$  para distintas  $u$ .

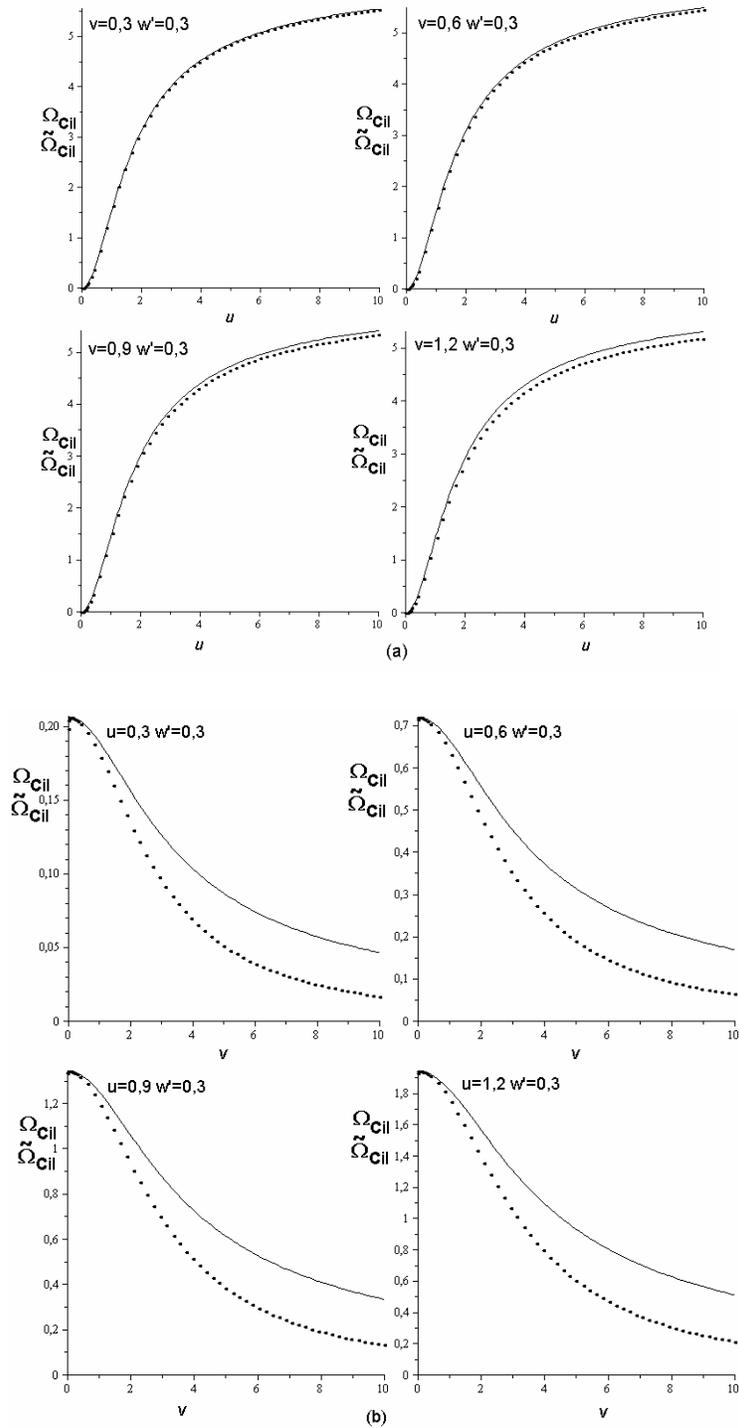


Figura 4. (a) Ángulo sólido promedio  $\Omega_{Cil}$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_{Cil}$  (línea punteada) para un SCCil coaxial vs  $u$  para distintas  $v$  y una misma  $w'$ . (b) Ángulo sólido promedio  $\Omega_{Cil}$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_{Cil}$  (línea punteada) para un SCCil coaxial vs  $v$  para distintas  $u$  y una misma  $w'$ .

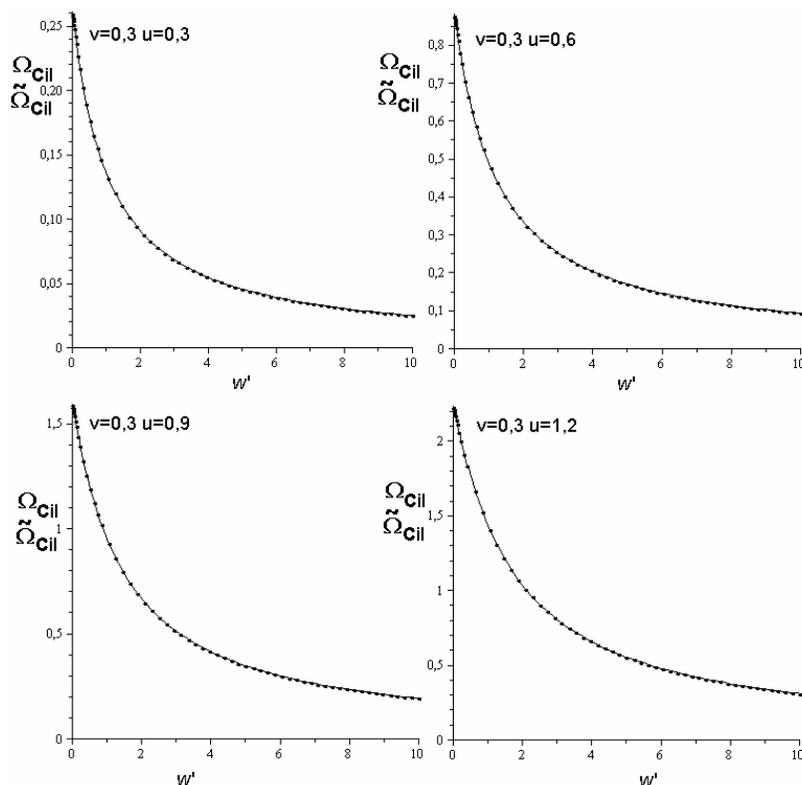


Figura 5. Ángulo sólido promedio  $\Omega_{Cil}$  (línea continua) y  $\tilde{\Omega}_{Cil}$  (línea punteada) para un SCCil coaxial vs  $w'$  para distintas  $u$  y una misma  $v$ .

sensibilidad de éstas a la variación de  $w'$  (relacionada con la altura de la fuente  $h_f$ ).

Los resultados obtenidos [7], [8], [11], [12], [14], [19] y [20] demuestran la existencia de fuentes equivalentes, en lo que al ángulo sólido respecta, por lo tanto:

1. El ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente anular coaxial es igual al ángulo sólido subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente puntual contenida en la fuente original. En otras palabras, la fuente anular tiene como fuente equivalente una fuente puntual contenida en ella.
2. El ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente lineal recta de longitud  $L$ ,

simétrica con respecto al eje del detector y paralela al mismo, es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente lineal recta que se origina en el eje del detector y es paralela al mismo, con una longitud igual a la mitad de la primera, es decir,  $L/2$ . En otras palabras, la fuente lineal recta tiene como fuente equivalente una fuente lineal recta que es la mitad de la misma.

3. El ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente circular coaxial es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente lineal recta contenida en dicha fuente, que se origina en el centro de la misma y termina en un punto de su

borde. En otras palabras, la fuente circular tiene como fuente equivalente una fuente lineal recta que va a lo largo de todo su radio. También es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente lineal recta contenida en la fuente original, ubicada a lo largo de todo su diámetro. En otras palabras, la fuente circular también tiene como fuente equivalente una fuente lineal recta ubicada a lo largo de todo su diámetro.

4. El ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente cilíndrica coaxial es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente rectangular contenida en dicha fuente, de altura igual a la altura de la misma y de base posicionada a lo largo de todo su radio. En otras palabras, la fuente cilíndrica tiene como fuente equivalente una fuente rectangular cuyas dimensiones son el radio y la altura de la fuente original. También es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente rectangular contenida en la fuente original, de altura igual a la altura de la misma y de base posicionada a lo largo de todo su diámetro. En otras palabras, la fuente cilíndrica también tiene como fuente equivalente una fuente rectangular inscrita en la fuente original, en su centro.
5. El ángulo sólido promedio subtendido por un detector circular con respecto a una fuente rectangular coaxial y perpendicular al plano del mismo, es igual al ángulo sólido promedio subtendido por el mismo detector con respecto a una fuente rectangular que es la mitad de la original. En otras palabras, la fuente rectangular tiene como fuente equivalente otra fuente rectangular que es la mitad de ella.

La introducción de las fuentes equivalentes en el cálculo del ángulo sólido es de gran utilidad para aquellos investigadores que usan Monte Carlo a la hora de abordar este tipo de problemas, ya que las fuentes extensas del tipo circular, disco y cilíndricas tienen como fuentes equivalentes unas de menor dimensión, lo que redundaría en la disminución del número de historias a realizarse durante el cálculo.

Por último, es fácil ver que el resultado [7], básico en lo que a las fuentes equivalentes respecta, es independiente de la consideración o no del término mixto  $2\rho R \cos(\varphi_o - \varphi)$  en [4] ya que al resolver la integral y evaluarla debería resultar una expresión independiente de la variable angular  $\varphi$ , lo que implica que todas las conclusiones a las que se han llegado son válidas también para los cálculos exactos.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr. José Fermín, Director del Departamento de Física, Facultad de Ciencias de LUZ, por contribuir al desarrollo del presente trabajo de investigación, mediante la asignación de un equipo de computación a uno de los miembros de nuestro equipo.

### Referencias bibliográficas

1. GARDNER R., VERGHESE K. *Nucl Instrum Methods Phys Res* (93): 163-167. 1971.
2. WILLIAMS I. *Nucl Instrum Methods Phys Res* (44): 160-162. 1966.
3. WIELOPOLSKI L. *Nucl Instrum Methods Phys Res* (143): 577-581. 1977.
4. OBLOZINSKY P., RIBANSKY I. *Nucl Instrum Methods Phys Res* (94): 187-188. 1971.
5. GARDNER R., CARNESALE A. *Nucl Instrum Methods Phys Res* (73): 228-230. 1969.
6. BURTT B. *Nucleonics* (28): 84-86. 1949.

7. BELLUSCIO M. **Nucl Instrum Methods Phys Res** (114): 145-147. 1974.
8. HOROWITZ Y., MORDECHAI S., DUBI A. **Nucl Instrum Methods Phys Res** (123): 551-555. 1975.
9. ABBAS M., SELIM Y. **Nucl Instrum Methods Phys Res** (480): 651-657. 2002.
10. ABBAS M. **Appl Radiat Isot** (64): 1048-1056. 2006.
11. WHITCHER R. **Radiat Prot Dosim Advance Access** (38): 1-16. 2006.
12. RIZK R., HATHOUT A., HUSSEIN A. **Nucl Instrum Methods Phys Res** (245): 162-166. 1986.
13. SOLDOVIERI T. Sobre el ángulo sólido y las fuentes equivalentes en sistemas espectrométricos (Trabajo de Ascenso para optar a la categoría 3 como Auxiliar Docente y de Investigación). Facultad Experimental de Ciencias. La Universidad del Zulia. Maracaibo (Venezuela). 42 pp. 2008.
14. PAGNUTTI C., GALIANO E. **APPL RADIAT ISOT** (66): 108-113. 2008.
15. GALIANO E., PAGNUTTI C. **Appl Radiat Isot** (64): 603-607. 2006.