

Radiación en números

W. Barreto
Noviembre, 2008

A riesgo de lucir arrogante, tampoco voy a ser modesto. Pretendo documentar aquí lo que considero ha sido mi trabajo más importante, individual y gregario, y su relación con cierto trabajo pionero de Sir Hermann Bondi. Queda advertido el lector que a continuación hago una síntesis de mi memoria académica en primera persona. Escuchando la voz de la historia de mis mayores, aprendí que *no se puede ir más rápido que la música*.

Mi trabajo en Relatividad General comenzó en la Semana Santa de 1987. Estaba haciendo la maestría en la UDO y empecé a trabajar en la tesis con Luis Herrera. Terminamos la tesis pronto y ya en 1988 estábamos trabajando para el doctorado en la UCV, culminado en julio de 1990. Desde un principio trabajamos con las coordenadas de Bondi para estudiar disipación en el colapso gravitacional usando el método de Caracas, conocido entre los colaboradores de Herrera como el HJR [1]–[5].

Luego, emprendí el camino “casindependiente”. Interpretando la viscosidad como anisotropía reportamos algunos modelos siguiendo el enfoque de Caracas [6], [7]. Estos dos trabajos marcaron el inicio del trabajo independiente y del trabajo en colaboración con mis estudiantes en Cumaná. Al interpretar la viscosidad como anisotropía logramos estudiar los efectos disipativos mediante la especificación de una ecuación de estado que da cuenta del grado de anisotropía, es decir, de la viscosidad. Estos son mis trabajos más citados.

En 1995 de licencia sabática comienzo a trabajar con el grupo de Pittsburgh, bajo el liderazgo de Jeffrey Winicour. El producto fue un trabajo sobre inestabilidad gravitacional de un solitón topológico, usando nuevamente las coordenadas de Bondi bajo simetría esférica [8]. Me familiarizo con el problema del comportamiento crítico descubierto por Choptuik y con las técnicas de la Relatividad Numérica en la formulación característica que Winicour y sus colaboradores desarrollaron durante cuarenta años y se materializó por medio del código de Pittsburgh. Aunque las bases sobre el estudio de la radiación gravitacional mediante la Relatividad General y fuera de la aproximación lineal fueron establecidas por Bondi, fue el trabajo de Winicour y Tamburino el que permitió generalizar el de Bondi para poder realizar simulaciones numéricas. Estas técnicas numéricas permitieron explorar las regiones asintóticas del espaciotiempo casi en paralelo con los desarrollos de Choptuik en la formulación 3+1. La generalidad de los resultados obtenidos con los códigos esféricos era tal que la extensión inmediata a mayor dimensionalidad ofrecía la posibilidad de simular radiación gravitacional. Era cuestión de tiempo. La tesis doctoral de Luis Lehner, estudiante de Winicour, ganaría el Premio Nicholas Metropolis a la mejor tesis en física computacional de los Estados Unidos en 1999.

Regreso a Venezuela con herramientas más sofisticadas para atacar problemas gravitacionales. Mi compromiso fue traer la Relatividad Numérica Característica en su formulación más general y actualizada. Además, trabajo con mis estudiantes sin seguir el formulismo de Caracas por un tiempo para, mediante la exigencia de simetrías adicionales –en particular homotecia– estudiar los efectos de la viscosidad, mecanismos de transporte radiativo extremos y carga eléctrica [9]–[11]. Winicour en su *Living Review* sobre la formulación característica nos dedica unas líneas al comentar nuestro trabajo sobre el efecto de la carga eléctrica en situaciones extremas del colapso gravitacional: “*El grupo de Barreto en Venezuela aplicó los métodos característicos para estudiar el colapso autosemejante de distribuciones esféricas de materia cargadas [19, 23, 20]. La suposición de autosemejanza reduce el problema a un sistema de EDO’s, sujetas a condiciones de borde determinadas por la solución exterior de Reissner-Nordström-Vaidya. Sus simulaciones ilustran cómo una carga total puede detener el colapso gravitacional y producir un estado final de equilibrio [20]. Es interesante que la presión se anula para el estado final de equilibrio tal que el soporte hidrostático es completamente provisto por la repulsión coulombiana*” [12].

No puedo dejar de mencionar el ambiente único creado en la UDO entre los años 1996 y 2000; fue el tiempo de mayor libertad académica y devoción irreverente que recuerde. El Laboratorio de Física Teórica fue de algún modo nuestro oasis en la UDO. Ahora contábamos con dos tipos de herramientas: las seminuméricas y las completamente numéricas. Unas orientadas al uso de computadoras personales, las otras a la computación masiva. Unas requieren más conocimiento de la física local, las otras de aspectos globales. Unas económicas, otras costosas.

En el año 2000 nos preguntábamos en Cumaná si podíamos hacer reingeniería al método de Caracas. (Este año se encontraron Bondi y Herrera en Salamanca.) Preparamos un trabajo usando las coordenadas de Schwarzschild en el interior, que de algún modo regresaba a los orígenes del método de Caracas, basado en el enfoque de Bondi del año 1964 sobre observadores comóviles con el fluido [13], [14]. El trabajo también fue un enfoque seminumérico del acoplamiento Cauchy-Characterístico, muy en boga para entonces. Luis Herrera al leer el manuscrito sin todavía aparecer publicado me invitó a una colaboración para dar una explicación al método de Caracas mediante lo que denominamos: *La aproximación post-casi-estática* [15]. Nuestro ecuménico Hermann Bondi, el 27 de enero del 2002, sobre este trabajo le comentó a Herrera: “*El artículo sobre esferas anisótropas que se contraen me recordó un trabajo que*

realicé hace algunos años (al cual haces referencia). Las condiciones que ustedes imponen en la superficie se describen con gran precisión y claridad y trae la situación casi estática de nuevo al tapete. Admiro la cantidad de trabajo que tú y tus colaboradores deben haber realizado para hacer que todo esto sea tan exhaustivo y claro” [16].

Recientemente recordaba con Luis Herrera que el trabajo sobre la interpretación del método de Caracas como la aproximación post-casi-estática fue enviado el 20 de enero del 2002 y aceptado en apenas dos semanas en *Physical Review D*, un récord para nosotros.

En marzo del 2005 aparece publicado un trabajo [17] resultado de la colaboración entre los grupos de Jeffrey Winicour y el nuestro en Mérida. Con mucho esfuerzo y con recursos computacionales limitados logramos desde Venezuela hacer la primera simulación tridimensional de radiación escalar y gravitacional interactuando con un agujero negro de Schwarzschild. (Este mismo año, el 17 de septiembre, muere Bondi.)

Durante el año 2006 dicté una serie de charlas (en realidad era la misma charla evolucionando en el espaciotiempo venezolano) en Mérida, Cumaná, Barquisimeto y Puerto Ordaz, como preámbulo a una en la Isla de Coche en tributo a los 60 años de Luis Herrera (y en mi silencio a Bondi). La charla de Coche fue titulada: *Ecos del espaciotiempo en la masa de Bondi*. Esta charla permitió presentar mi síntesis de la Relatividad Numérica en la formulación característica para explorar los límites del espaciotiempo, sobre todo en regímenes muy dinámicos y no lineales. La charla además hacía referencia explícita al comportamiento crítico y mostraba las poderosas técnicas numéricas cuyo origen reside en la obra de Bondi y Winicour. Mostraba numéricamente los teoremas de Christodolou sobre el colapso o dispersión de un campo escalar sin masa y cómo en un caso práctico se “conserva” la constante de Newman–Penrose y la energía asociada a la radiación escalar, aún cuando se forma un agujero negro. La charla fue motivada por discusiones previas con Luis Herrera sobre el Teorema de Israel.

En enero del 2007 en colaboración con Luis Rosales y Orlando Serrano (en Puerto Ordaz) y con Beltrán Rodríguez (en San Diego, EE.UU.) publicamos un trabajo en donde interpretamos la carga eléctrica como anisotropía [18], retomando la idea de la viscosidad como anisotropía del año 1993 [6]; este trabajo generalizó el modelo anterior [10] comentado por Winicour. Este año, en colaboración con Luis Herrera (UCV), Alicia Di Prisco (UCV) y Jaume Carot (Universidad de las Islas Baleares) publicamos un sugerente y sutil trabajo sobre la producción de vorticidad por la radiación gravitacional [19], [20]. Logramos calcular la vorticidad de las líneas–mundo para observadores en reposo respecto al referencial de Bondi–Sachs. Aseguramos que tal efecto está relacionado con el vector super–Poynting, de forma similar como la existencia de un vector de Poynting electromagnético está relacionado con la vorticidad en un espaciotiempo estacionario del electro–vacío. En este último trabajo usamos la métrica de Bondi–Sachs que es la métrica de radiación

de Bondi generalizada para estudiar situaciones tridimensionales [21], con la cual ya me encontraba familiarizado por los trabajos con el grupo de Jeff Winicour.

Durante el primer semestre del 2007 solicité una licencia para culminar un proyecto en colaboración con Roberto Gómez (en el Centro de Supercomputación de Pittsburgh y Universidad de Carnegie Mellon) y Simionetta Frittelli (Universidad de Duquesne y Universidad de Pittsburgh). Gómez y Frittelli colaboraron muchos años con Jeff Winicour y Ted Newman, fundadores del grupo de relatividad en Pittsburgh. El proyecto consistió en hacer simulaciones tridimensionales de radiación escalar y gravitacional, usando la métrica de Bondi–Sachs y una supercomputadora Cray XT3 con más de 4.000 procesadores. Los resultados fueron publicados en un artículo de *Physical Review D*, el 26 de diciembre del 2007 [22]. Vale mencionar que en este trabajo se usa una técnica muy conveniente para la computación de alto rendimiento, denominada “cubo inflado”, que proviene de la meteorología y oceanografía [23], [24], y es usada actualmente para modelar el clima global [25].

En marzo del 2008 dicté una charla invitada, en el marco del VI Congreso de la Sociedad Venezolana de Física, titulada “*Integrales de Winicour–Tamburino (Linkages): Conservación de la energía en un espaciotiempo que contiene un agujero negro de Schwarzschild*”. Las integrales de Winicour–Tamburino (*Linkages*) son una representación finita del grupo de simetría asintótica de Bondi–Metzner–Sachs (*BMS*). En el proceso de construcción de un código en paralelo denominado LEO, para cálculos a gran escala y de alta resolución, hemos usado las *Linkages* como prueba física para calibración numérica. Mostramos la conservación de la energía para un espaciotiempo que contiene un agujero negro de Schwarzschild. Asociado al subgrupo, normal al grupo *BMS*, único y cuadriparamétrico, encontramos el generador global de la simetría de traslación temporal en simetría esférica. La descripción del movimiento a lo largo de la órbita conforme permite observar la conservación de la energía aún en situaciones extremas del colapso de un campo escalar sin masa.

En mayo del 2008 dicté un curso sobre relatividad numérica en la formulación característica, en el marco de las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela. Hay una versión escrita del curso titulado: 5 clases sobre relatividad numérica característica (<http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/wbarreto/relativum/5clases.pdf>).

Recientemente, Jeff Winicour en la actualización de su *Living Review* nos ha dedicado unas cuantas secciones y líneas comparando nuestro trabajo con el realizado por otros autores (ver en [13] las secciones 4.2.3, 4.2.4., 4.2.5 y 4.2.6): “*Gómez, Barreto y Frittelli desarrollaron el enfoque del cubo inflado en un código tridimensional eficiente y altamente paralelizado, el código LEO, para la evolución característica del sistema acoplado de ecuaciones Einstein–Klein–Gordon en el formalismo de*

*Bondi–Sachs [109]. Demostraron que este código es con-
veniente y de alta precisión en el régimen lineal mediante
la simulación de modos casi–normales del campo escalar
y de la conservación de la energía–momentum ”...siguen
comentarios sobre detalles computacionales de la estrate-
gia de paralelización usando el cubo inflado, y “... el
objetivo que persiguen es desarrollar el código LEO para
aplicarlo al sistema binario agujero negro–estrella de neu-
trones en el régimen de órbita cercana, donde la ausen-
cia de cústicas hace que la pura evolución característica
sea posible. La primera aplicación anticipada es la simu-
lación de una estrella de bosones orbitando un agujero
negro, cuya dinámica se describe por las ecuaciones de
Einstein–Klein–Gordon. Ellos señalan que la evolución
característica de tales sistemas es de interés astrofísico y
ha estado limitada en el pasado por la falta de resolución
inherente al poder de cómputo requerido, infraestructura
paralela y refinamiento de mallas. La mayor parte del
desarrollo tecnológico de los códigos característicos han
estado orientados hacia las máquinas de un procesador,
mientras que las plataformas computacionales actuales
están diseñadas para realizar simulaciones de alta reso-
lución en tiempos razonables mediante procesamiento en
paralelo.” La simulación de situaciones nunca antes posi-
bles, es el potencial del código LEO: para realizar cálculos
con tecnología de punta mediante computación de alto
rendimiento y en paralelo.*

Si me preguntaran por mis cinco trabajos más impor-
tantes, diría que son en orden cronológico:

- N. Luiggi y W. Barreto, *Parametrization of the re-
laxation time in crystalline graphite*, Phys. Rev. B.
34, 2863 (1986).

- W. Barreto, *Exploding radiating viscous spheres in
general relativity*, Ap. Sp. Sc. 201, 191 (1993).
- W. Barreto, L. Lehner, R. Gómez y J. Winicour,
Gravitational instability of a kink, Phys. Rev. D
54, 6, 3834 (1996).
- L. Herrera, W. Barreto, A. Di Prisco y N. Santos,
*Relativistic gravitational collapse in non–comoving
coordinates: the post–quasi–static approximation*,
Phys. Rev. D (2002).
- R. Gómez, W. Barreto y S. Frittelli, *Framework
for large scale relativistic simulations in the cha-
racteristic approach*, Phys. Rev. D, 76, 12, 124029
(2007).

En estos trabajos:

- Aprendí a investigar (con mi tutor Luiggi);
- Demostré independencia (de mi tutor Herrera);
- Busqué nuevos horizontes (con mi tutor Winicour);
- Reinventamos y reinterpretamos el método de
Caracas (HJR);
- Laboramos con meticulosidad y profundidad desde
el punto de vista físico y numérico; el potencial es
enorme.

Y si me preguntaran por qué hago lo que hago, afirmarí-
a: para entender la radiación desde los números, transmitir
lo aprendido y albergar la esperanza de ser útil.

-
- [1] L. Herrera, J. Jiménez y W. Barreto, J. Can. Phys. 67,
855 (1989).
 - [2] W. Barreto, L. Herrera y N. Santos, Ap. J. 344, 158
(1989).
 - [3] L. Herrera, J. Jiménez, W. Barreto, M. Esculpi, N. San-
tos y G. Le Denmat, Ap. Sp. Sc. 165, 211 (1990).
 - [4] W. Barreto, L. Herrera y L. Núñez, Ap. J. 375, 663
(1991).
 - [5] W. Barreto, L. Herrera y N. Santos, Ap. Sp. Sc. 187, 271
(1992).
 - [6] W. Barreto y S. Rojas, Ap. Sp. Sc. 193, 201 (1992).
 - [7] W. Barreto, Ap. Sp. Sc. 201, 191 (1993)
 - [8] W. Barreto, R. Gómez, L. Lehner y J. Winicour, Phys.
Rev. D 54, 6, 3834 (1996).
 - [9] W. Barrero, J. Ovalle y B. Rodríguez, Gen. Rel. & Grav.
30, 1, 15 (1998).
 - [10] W. Barreto y A. Da Silva, Class. & Quantum Grav. 16,
1783 (1999).
 - [11] W. Barreto, C. Peralta y L. Rosales, Phys. Rev. D 59 2,
024008 (2000).
 - [12] J. Winicour, “Characteristic Evolution and Matching”,
Living Rev. Relativity 8 (2005), [http://www.living-
reviews.org/lrr-2005-10](http://www.living-
reviews.org/lrr-2005-10); para una versión más reciente
ver arXiv:0810.1903v2 [gr-qc].
 - [13] H. Bondi, Proc. Roy. Soc. London A 281, 39 (1964).
 - [14] W. Barreto, H. Martínez y B. Rodríguez, Ap. Sp. Sc. 282
(3) 581 (2002).
 - [15] L. Herrera, W. Barreto, A. Di Prisco y N. Santos, Phys.
Rev. D 65 104004 (2002).
 - [16] H. Bondi, en comunicación privada a L. Herrera (2002).
 - [17] W. Barreto, A. Da Silva, R. Gómez, L. Lenher, L. Rosales
y J. Winicour, Phys. Rev. D 71, 064028 (2005).
 - [18] W. Barreto, B. Rodríguez, L. Rosales y O. Serrano, Gen.
Rel. & Grav. 39 (1) 23 (2007); Errata, 39 (4) 537 (2007).
 - [19] L. Herrera, W. Barreto, A. Di Prisco y J. Carot, Class.
& Quantum Grav. 24, 10, 2645 (2007).
 - [20] H. Bondi, M. van der Burg y A. Metzner, Proc. Roy. Soc.
London A 269, 21 (1962).
 - [21] R. Sachs, Proc. Roy. Soc. London A 270, 103 (1962).
 - [22] R. Gómez, W. Barreto y S. Frittelli, Phys. Rev. D 76,
12, 124029 (2007).
 - [23] C. Ronchi, R. Iacono, and P. S. Paolucci, J. Comput.
Phys. 124, 93 (1996).
 - [24] R. Sadourny, Mon. Weather Rev. 100, 136 (1972).
 - [25] A. Adcroft, J. M. Campin, C. Hill, and J. Marshall, Mon.
Weather Rev. 132(12), 2845 (2004); ver también *MIT’s
Climate Modeling Initiative*, <http://paoc.mit.edu/cmi/>.