



## Simulación aplicada al arte digital

Víctor González

Next Limit Technologies

e-mail: [victor@nextlimit.com](mailto:victor@nextlimit.com)

página web: <http://www.nextlimit.com>

*Pinche sobre una fórmula para ampliarla. Vuelva a pinchar sobre ella para reducirla, o pinche manteniendo pulsada la tecla [shift] para reducir todas las que permanezcan ampliadas.*

Aunque siempre se ha observado una distinción clara entre el lenguaje artístico y el científico, el ser humano constantemente se ha nutrido y beneficiado de la tecnología disponible en cada momento para llevar a cabo su expresión artística. Desde las pinturas rupestres realizadas hace miles de años hasta las refinadas técnicas del arte pictórico clásico y moderno, el conocimiento de la tecnología siempre ha estado presente de forma consciente o inconsciente. Por ejemplo, Miguel Ángel no sólo es un genio artístico, sino un gran técnico en el conocimiento de diferentes procesos físicos: la química de las pinturas, las fuerzas de tensión del mármol, etc. Podríamos decir que los artistas han tenido que aprender a utilizar la tecnología disponible e, incluso, a desarrollar nuevas técnicas para aumentar la complejidad de sus creaciones.

Actualmente contamos con una herramienta poderosa de creación virtual: el ordenador. Es evidente el gran apoyo que ha prestado este moderno *cinzel* a la expresión artística, abriendo todo un nuevo espectro de posibilidades de expresión en formato "digital" (imagen, sonido, secuencias animadas, entre otras) que permiten al artista disponer de recursos virtualmente ilimitados, además de brindarle una posibilidad sugerente: la edición. Alguien propuso una vez que se debería levantar una estatua a aquél que inventó el comando "Undo" (deshacer).

El lenguaje científico y la terminología técnica se han visto, más que nunca, estrechamente vinculados con el arte a través del medio digital. Un artista digital debe conocer suficientemente la tecnología implicada y obtener los conocimientos técnicos precisos para conseguir los resultados deseados. Es sobre este terreno conceptual de interrelación entre arte y tecnología donde nuestro equipo de investigación y desarrollo ha estado trabajando en los últimos nueve años.

La empresa española *Next Limit Technologies* [[www.nextlimit.com](http://www.nextlimit.com)], fundada por Víctor González e Ignacio Vargas en 1998, ha venido desarrollando productos informáticos (*software*) de simulación de procesos físicos orientados a diversos campos y especialmente a su aplicación en la creación de contenidos visuales, como por ejemplo el cine. En los últimos 25 años ha existido una tendencia en aumento en la creación de contenidos virtuales mediante el uso de ordenadores para su aplicación en medios audiovisuales, principalmente cine y televisión. La necesidad de simular entornos virtuales con alto grado de realismo sigue ejerciendo una presión creciente en la industria de los efectos especiales. Desde la mítica película *Tron* (1982) hasta la reciente saga de *El Señor de los Anillos*, la necesidad de simulación sigue siendo un factor importante en la expresión artística. Procesos físicos tales como explosiones, tsunamis, tornados, la erupción de lava de un volcán y muchos otros procesos dinámicos complejos que suceden en el "mundo real", son cada vez más requeridos para ser creados por los ordenadores.

No es de sorprender que la necesidad principal de incrementar la capacidad de simulación virtual venga impuesta en mayor medida por motivos económicos, ya que la demanda creciente de contenidos "nuevos", sin duda afectada por el torrente de información visual a la que estamos sometidos, se encuentra con grandes dificultades para ser ofertada mediante las técnicas de efectos especiales clásicas. Es obvio imaginar la gran diferencia en costes que puede tener el hecho de construir una maqueta de un barco lo más realista posible, colocarlo en una piscina a escala, y destruirlo mediante explosiones controladas con solamente una oportunidad para que salga correcta la toma, contra la opción de realizar el proceso mediante un ordenador. Imaginen si al director no le gusta la escena y manda repetirla.

Nuestro equipo de investigación, compuesto por un conjunto de ingenieros, programadores y artistas digitales, comenzó hace ya varios años a trabajar en métodos de simulación de fluidos mediante técnicas nuevas de partículas. La idea surgió de dos fuentes principales: primero, la búsqueda de métodos de cálculo de fluidos más modernos que los tradicionales basados en elementos finitos (FEM). Segundo, la necesidad de herramientas de simulación de fluidos en el sector de los efectos especiales para cine. En ese momento no existía ninguna forma de simular fluidos y cualquier efecto debía ser recreado mediante maquetas, piscinas acondicionadas, entornos reales, etc. Por ejemplo, en *Parque Jurásico*, los efectos de salpicadura de los dinosaurios al pisar los charcos se conseguían filmando un charco real y posteriormente componiendo digitalmente la imagen real con la sintética del dinosaurio.

Comenzamos pues trabajando en métodos de simulación mediante partículas, aunque la mayoría de los ingenieros utilizaban elementos finitos como método de cálculo. Los métodos de simulación basados en elementos finitos cuentan con una serie de ventajas, principalmente, su gran capacidad para capturar procesos estacionarios con una precisión muy elevada, además de su rigor matemático fuertemente corroborado a lo largo de los años. Sin embargo, su principal desventaja se centra en la aplicación a fenómenos de alta transitoriedad y en donde las fronteras están sometidas a fuertes deformaciones. Por ejemplo, para el caso de los fluidos, el impacto de olas rompientes contra estructuras semisólidas (rocas, arena, coches, edificios, personas) o el movimiento de un buque sometido a fuertes golpes de mar en una tormenta. En estos casos no es práctico abordar el problema con un esquema de elementos finitos. Otra desventaja importante de éstos es la necesidad de generar un mallado computacional sobre el que se

calculen las propiedades físicas. La mayor o menor bondad de la malla y su dependencia en los resultados suele ser una ?tortura? para los programadores u operadores del sistema, aunado a la dificultad extrema en el caso de que todo el sistema se esté deformando, como en los casos comentados anteriormente.

Se hacía pues necesario trabajar sobre métodos de simulación de fluidos que permitieran una mayor facilidad de operación por parte de un usuario no técnico y con una mayor robustez para adaptarse a situaciones poco definidas a priori. Los métodos de partículas comenzaron a surgir hacia finales de los años 70, principalmente en campos de astrofísica donde es muy conveniente utilizar una representación intuitiva de los cuerpos siderales. Uno de los primeros métodos presentados fue el SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), concebido como aproximación de los métodos de Monte Carlo para la resolución de problemas de gases y aplicado inicialmente al modelado de fenómenos astrofísicos, aunque pronto se extendió a otros campos como fluidos cuasi-incompresibles o mecánica de sólidos. El equipo de *Next Limit* se basó en los conceptos del SPH original para desarrollar un modelo mejorado, por lo que se expone a continuación una introducción al método.

## Introducción al método de partículas SPH

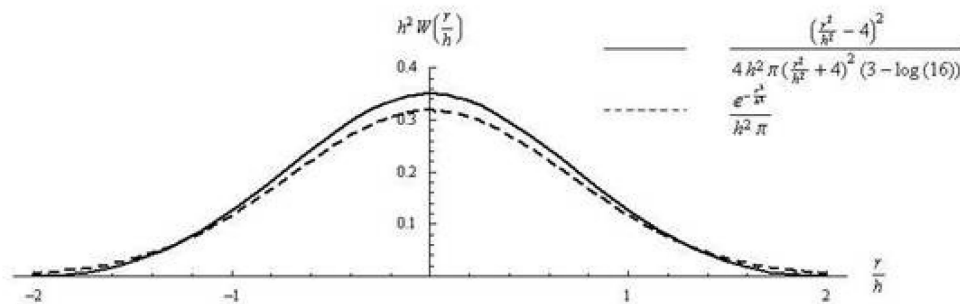
El método SPH aproxima las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos (también llamadas *ecuaciones de Navier-Stokes*) mediante una función integral que promedia ("suaviza") el valor de la función a partir de los valores en el entorno del punto en cuestión. En general, una función  $f(r)$  puede ser aproximada a  $\langle f(r) \rangle$  mediante:

$$\langle f(r) \rangle = \int_{\Omega} f(r') W_{r,h}(r') dr',$$

donde  $W$  es la función de suavizado o *kernel*, una función escalar de la distancia entre partículas y extendida a lo largo del dominio  $\Omega$ . El kernel  $W$  debe cumplir una serie de propiedades matemáticas:

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(r_{ij}, h) = \delta(r_{ij}), \quad \int_{\Omega} W(r_{ij}, h) dr_{ij} = 1,$$

donde  $r_{ij}$  es la distancia entre partículas y  $\delta$  es la función delta de Dirac. La función gaussiana es la que cumple con estas propiedades; sin embargo, debido a su extensión infinita en el dominio, se reemplaza por una función compacta de tipo *spline* o similar.



Ejemplo de kernel (gaussiano vs. spline).

A través del formalismo de SPH se llega finalmente a la versión discreta de las ecuaciones de continuidad, momento y energía de Navier-Stokes. Como muestra, la ecuación de continuidad permite calcular la densidad en un punto del fluido mediante una suma discreta de las propiedades de las partículas (masa) alrededor del punto, y queda representada de la siguiente manera:

$$\langle \rho \rangle_i = \sum_j m_j W(r_i - r_j, h_{ij}).$$

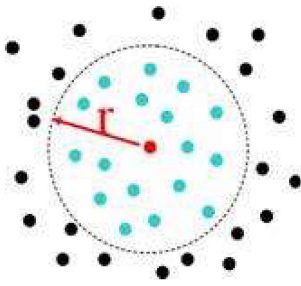
De igual modo, el momento en un punto se calcula como contribución promediada de valores de presión ( $p$ ), masa ( $m$ ), viscosidad ( $\mu_i$ ) y tensor de esfuerzos ( $\varepsilon_i$ ) de las partículas vecinas:

$$\left\langle \frac{Dv^\alpha}{Dt} \right\rangle_i = - \sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} + \sum_j m_j \frac{\mu_i \varepsilon_i^{\alpha\beta} + \mu_j \varepsilon_j^{\alpha\beta}}{\rho_i \rho_j} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + F_i.$$

El cálculo de la presión se realiza mediante una ecuación de estado. Esto permite una gran versatilidad al poder utilizar cualquier ecuación de estado, desde el gas ideal o isentrópico a fórmulas empíricas para simular líquidos de gran incompresibilidad.

El método SPH pertenece a la categoría de métodos *lagrangianos*, en los cuales los puntos donde se calculan las propiedades del fluido se desplazan y transportan las propiedades en su movimiento, en oposición a los métodos *eulerianos* (donde se incluyen los elementos finitos) en los cuales las propiedades físicas se calculan en puntos estáticos que no tienen por qué representar elementos físicos reales. De ahí la necesidad que tienen los métodos eulerianos de crear una malla computacional no física, que tantos quebraderos de cabeza suele traer.

Nuestros ingenieros han encontrado en los métodos lagrangianos una representación mucho más natural del fluido, ya que el cálculo se produce sobre las propias partículas que componen el fluido y no requiere mallado computacional. Esta naturalidad es



ideal para usuarios no técnicos como es el caso de nuestros clientes de perfil mayoritariamente artístico. Nuestra metodología permite “visualizar” el fluido en movimiento; por el contrario, los elementos finitos deben añadir una capa de visualización ficticia a partir de las variaciones del campo de velocidad calculadas en puntos fijos.

Desde un punto de vista computacional, este tipo de métodos permite una resolución *explícita*, lo que significa que todos los cálculos son locales para cada partícula y se pueden resolver de manera iterativa sin necesidad de resolver sistemas lineales de gran tamaño. Esto es esencial para permitir un aumento de la complejidad del problema (más partículas y más objetos en interacción) sin que suponga un contratiempo numérico importante, puesto que sólo añaden carga lineal de cálculo al sistema. Sin embargo, también conlleva algunos problemas inherentes, como la mayor dificultad en

obtener fluidos totalmente incompresibles o las discontinuidades de densidad en las fronteras.

Para una revisión más detallada del método SPH y otros métodos de partículas referimos al lector a las referencias indicadas al final de este artículo, y en general a toda la literatura asociada a los métodos de partículas.

## RealFlow?

*RealFlow* es la aplicación comercial creada por *Next Limit Technologies* para la simulación de fluidos y sólidos rígidos en la industria de los efectos especiales, actualmente única en su género. *RealFlow* utiliza una formulación propietaria para la simulación de fluidos mediante partículas que soluciona algunos problemas inherentes de estos métodos, como se ha mencionado anteriormente.

La creación de un producto de simulación como *RealFlow* conlleva algunas particularidades y retos importantes al orientarse a un tipo de cliente de perfil artístico interesado en resultados visuales y no numéricos. Los diseñadores del *software* han tenido que esforzarse en reducir los tecnicismos relativos a la simulación numérica. La interfase de usuario se ha diseñado para ser lo más intuitiva posible y permitir la operatividad e interactividad que se espera en productos de este sector, la cual debe ser muy alta. Otro punto muy importante ha sido la integración del producto en el *workflow* del cliente. Actualmente, la realización de efectos especiales por ordenador se ha convertido en un arte bastante complejo que opera en forma de “cadena de producción”. Para una misma escena el trabajo se reparte en varios equipos especialistas de modelado, iluminación, texturizado, animación y simulación o efectos. Es esencial una buena coordinación a nivel técnico y compatibilidad máxima ya que los equipos trabajan con *software* diferente. Por ello, *RealFlow* debe comunicarse de forma eficiente en los procesos de entrada y salida con estos otros productos. Todas estas características han hecho que *RealFlow*, después de diez años en el mercado, mantenga el liderazgo en el sector sin que exista un claro competidor alternativo.

*RealFlow* ha sido utilizado en cientos de producciones cinematográficas y anuncios televisivos. Podemos destacar producciones como *300*, *El Señor de los Anillos*, *Poseidón*, *Tomb Raider*, *The Guardian*, *Chocolate Factory*, *El Código Da Vinci*, *Ice Age 2*, *Dockers* (anuncio TV), *The Saints Are Coming* (video musical U2) y muchos otros. También ha sido utilizado por empresas de otros sectores para crear simulaciones visuales, como es el caso de la NASA para representar el movimiento del agua en los canales de Marte. En estos casos los clientes han pretendido obtener un resultado cualitativo y no numérico que en muchas ocasiones es suficiente para mostrar los procesos físicos.

En esta parte final del artículo se mostrará un ejemplo concreto de aplicación de *RealFlow* en una película. Conjuntamente, se invita al lector a visitar la página web del producto [[www.realflow.com](http://www.realflow.com)], donde podrá encontrar más casos de aplicación en producciones cinematográficas conocidas.

A la empresa estadounidense *CIS Hollywood* se le encomendó la tarea de crear determinados efectos digitales para la película *Poseidón*. En este film, un buque de pasajeros queda completamente invertido sobre el mar al ser embestido por una ola gigante. En el transcurso de la película suceden varias secuencias que incluyen movimientos de grandes masas de agua. En algunos casos, estas secuencias fueron realizadas con los actores reales en piscinas especialmente acondicionadas para estos efectos; sin embargo, en otros casos los fluidos fueron completamente virtuales.

Una de las escenas en cuestión requería la simulación de una gran masa de agua que recorre un largo corredor y se aproxima hacia el espectador. La columna de agua arrolla violentamente todo lo que se encuentra a su paso y amenaza con alcanzar a los actores. Para ello, primeramente se recreó parte del decorado en el ordenador mediante un sistema de scanner *3D LIDAR* que permitió obtener una nube de puntos tridimensionales a partir del entorno real. Después se reconstruyó la escena tridimensional completa a partir de los puntos obtenidos por el scanner.



Nube de puntos obtenida por el escáner LIDAR.

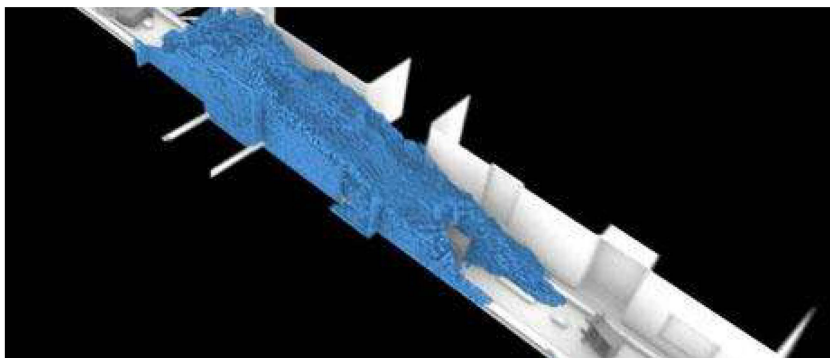


Reconstrucción poligonal del entorno 3D.

Se realizaron diferentes simulaciones de fluido utilizando *RealFlow*, variando diferentes parámetros como presión, resolución, entre otros, para obtener los resultados más cercanos a los requerimientos de la dirección. En la escena en cuestión se utilizaron de forma simultánea diferentes simulaciones combinadas para crear un efecto más complejo.

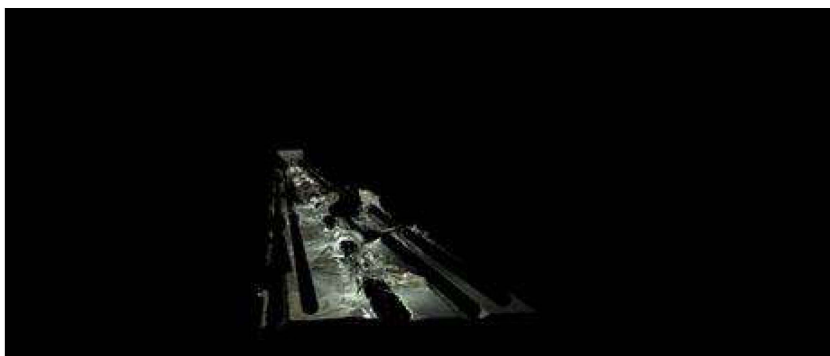


Pruebas de simulación del fluido.



Simulación del fluido en el modelo 3D.

Una vez que se obtuvo la dinámica de simulación deseada, se procedió a trabajar en el proceso de generación de imagen, también llamado *rendering*. La correcta representación e iluminación del fluido es esencial para conseguir el mayor grado de realismo en la escena. Una buena simulación sin un *rendering* adecuado resultaría inservible. Cada simulación se iluminó de forma independiente, como es tradicional en el proceso de composición por capas, de tal manera que se puedan superponer de múltiples formas a elección del compositor. La iluminación tuvo en cuenta las propiedades ópticas del agua, incluyendo reflexión y refracción.



Capa de iluminación del fluido.



Capa de iluminación del fluido.

Finalmente, todas las capas de simulación e iluminación se integraron en la escena, añadiendo efectos luminosos y el movimiento de cámara.



Composición final de la escena y video  
[[http://www.nextlimit.com/reafflow/img/cs/poseidon/mov\\_16.htm](http://www.nextlimit.com/reafflow/img/cs/poseidon/mov_16.htm)].

## Evolución

Nos encontramos aún en los comienzos de la aplicación de la simulación al arte digital. Si bien actualmente se han conseguido grandes avances debido en gran parte a la potencia de cálculo de los ordenadores, aún nos encontramos en una fase muy temprana. Los grandes retos residen en la simulación de procesos físicos de gran escala y gran complejidad de una manera semiautomática y con poco esfuerzo por parte del usuario. El creador debe preocuparse por dirigir su escena desde la perspectiva artística, sin que la simulación y las cuestiones técnicas obstaculicen el proceso. Pero esto aún dista de ser cierto. Actualmente la creación de estos conceptos requiere gran dosis técnica, tiempo y personal dedicados exclusivamente a este menester. El océano de la película *La Tormenta Perfecta* realizado por la empresa *Industrial Light & Magic* requirió varios meses de trabajo a medida, por no existir aún un sistema que pueda simular un océano de tal complejidad.

En el futuro, podremos pensar en escenas del calibre de un buque en una tormenta en alta mar, un vendaval, una playa con rompeolas, un huracán destrozando los objetos que se encuentra a su paso, etc. como elementos que el artista añade a la escena sin preocuparse por los elementos técnicos involucrados. Estos procesos deberán simularse de una manera automática y desatendida, excepto por el grado de control permitido al artista (el huracán se moverá en tal o cual dirección, etc.).

Extrapolando este concepto hacia cotas más futuristas, con el advenimiento de ordenadores más potentes y redes de cálculo en paralelo, se podrán realizar simulaciones físicas complejas en tiempo real, abriendo de par en par la puerta de la realidad virtual y la inmersión en mundos digitales de realismo físico asombroso, tanto para aplicaciones de ocio como industriales o científicas. La realidad virtual requerirá la simulación de todos los procesos físicos evidentes como la gravedad, colisión y rotura de objetos, lluvia, viento, etc. Sin simulación física los mundos virtuales estarían "muertos". Para todos aquéllos que hemos visto la película *Matrix* y su mundo virtual indistinguible de la realidad, nuestro trabajo camina hacia ese concepto, aunque esperamos que el futuro no sea tan oscuro como el que muestra la película.

## Referencias

J.J. Monaghan: Simulating Free Surface Flows with SPH. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 30 (1992), 543-574.

L.B. Lucy: *J. Astron.* 82 (1977), 1013.

P.W. Randles, L.D. Libersky: SPH: Some recent improvements and applications. *Comput. Methods in Appl. Mech. And Engrg.* 139 (1996), 375-408.

## Sobre el autor



**Víctor González** (Madrid, 1971) es Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid y fundador-director de *Next Limit* SL. Esta empresa nació con el objetivo de crear productos informáticos basados en la simulación virtual de procesos físicos y de gran utilidad en distintas ramas de la ciencia y la ingeniería, especialmente en la simulación virtual aplicada a los medios audiovisuales, como el cine y la televisión. Su primer producto fue *RealFlow* (simulación de la dinámica de fluidos en 3D), que ha sido utilizado con gran éxito en películas (como *El Señor de los Anillos*, *Tomb Raider*, *Chocolate Factory...*), en anuncios televisivos, en la NASA... A *RealFlow* siguieron otros productos, como *Maxwell Render* (generación de imagen virtual – *rendering*– mediante simulación física de luz y materiales), que ha supuesto una revolución en el mercado arquitectónico y de diseño por su capacidad de obtener imágenes sintéticas indistinguibles de la realidad, y *XFlow* (simulador de fluidos y estructuras para ingeniería), tecnología que permite abordar problemas de ingeniería donde el fluido y la estructura interaccionan de forma compleja.