

Modelo para la Simulación de Fenómenos Turbulentos para Ambientes de Realidad Virtual

Daniel Arturo Barrero Ulloa
e-mail: d-barrer@uniandes.edu.co

José Tiberio Hernández
e-mail: jhernand@uniandes.edu.co

MOX - Computación Avanzada en Ingeniería
Universidad de los Andes

Abstract

El modelaje de fenómenos turbulentos complejos y su influencia sobre diversos elementos a los cuales da forma como el humo, fuego, nubes, etc., es un problema complejo y a la vez atractivo debido a la aplicabilidad de su solución en la vida práctica. Su solución requiere la combinación de campos de movimiento, flujo gaseoso, e iluminación realista. Aquí se presenta un modelo por medio de niveles de turbulencia para los campos de movimiento, cada uno de los cuales se puede definir de manera diferente, siendo cada nivel afectado únicamente por el nivel anterior, esta subdivisión permite contornear las discontinuidades de las ecuaciones de dinámica de fluidos, facilitando su solución. Además se utiliza un método de modelaje por medio de bases de turbulencia para los niveles, basado en la observación de formas características en los fenómenos de este tipo, y en el cual se introducen irregularidades por medio de modelaje estocástico. Para el modelo de los gases y su animación se utiliza un modelo de vección-difusión embebido en un campo de movimiento.

Categorías y Descriptores de Tema: [Computación gráfica]: Gráficas Tridimensionales y Realismo, Generación de Imágenes, [Mecánica de Fluidos]: Turbulencia, Dinámica de Fluidos, Fenómenos Gaseosos, [Probabilidad y Estadística]: Procesos Estocásticos, Algoritmos Probabilísticos.

Frases y palabras clave adicionales: flujo turbulento, campos de movimiento, modelaje estocástico, humo, fuego, modelaje por capas, modelos de iluminación.

Introducción

Al observar diversos fenómenos naturales como el humo, el fuego, las nubes, se aprecia cómo la forma de estos objetos está caracterizada por irregularidades que son una de sus principales rasgos distintivos. En el caso de los fenómenos gaseosos como el humo, estas irregularidades son resultado de la interacción del objeto con el medio, y sus alteraciones en la forma son realmente la visualización de los llamados fenómenos de turbulencia.

Para el modelaje de los fenómenos de turbulencia se requiere que se modele no solo el objeto en cuestión (p.ej. humo), sino que se debe modelar también el medio (viento), y la interacción entre los dos (el fenómeno en sí). Este problema puede ser atacado de maneras muy diversas: desde el modelo físico completo del fenómeno lo que se trata por medio de dinámica de fluidos [FOL92][KAS90][ROG84][CFD95][STR95], pasando por modelos

estocásticos[AVE89][FOL92][STA93][REE85][WIT87], hasta modelos puramente geométricos[EBE94][FOL92][HAR86] en los que no existe un modelo implícito del fenómeno.

Lo que se desea es encontrar un modelo para este tipo de fenómenos, que no solo sea una buena aproximación, sino que también pueda ser realizado de una manera suficientemente eficiente, de modo que se pueda ofrecer realismo en las imágenes producidas para sistemas de tiempo real (Realidad Virtual, etc.). Así mismo se quiere encontrar un modelo que sea controlable, y suficientemente flexible para poder permitir su combinación con otros métodos de manera que se puedan lograr niveles distintos de realismo de acuerdo con diferentes necesidades.

El modelaje estocástico es una alternativa muy natural para este tipo de fenómenos, ya que se puede simular la aparición de irregularidades de manera controlada y es lo bastante flexible para poder permitir su aplicación en una amplia variedad de fenómenos[CFD95][STR95].

El modelo propuesto aquí difiere de los propuestos anteriormente, en el sentido que se utiliza el modelo estocástico sobre un modelo geométrico de los fenómenos para modelar diferentes niveles de turbulencia. Otra diferencia es el que tradicionalmente se supone la evolución del tiempo como una constante determinística (hipótesis de Taylor), mientras que aquí corresponde también a un proceso estocástico. En el modelo presentado se manejan el medio como campos de movimiento divididos en componentes de gran y pequeña escala, y los gases como distribuciones de densidad de partículas, cuya evolución se describe también por medio de procesos estocásticos.

I. Bases de Turbulencia

Si se observan con detenimiento los fenómenos turbulentos, se pueden identificar claramente un conjunto de formas las cuales aparecen de manera repetitiva, como los vórtices, que aparecen no solo de manera aparentemente independiente, sino que muchas de las formas observadas en estos fenómenos se pueden producir a partir de la combinación de un conjunto de geometrías base.

De acuerdo con esto un fenómeno de turbulencia se puede asimilar a un grupo cuya base corresponde a un conjunto de campos de movimiento linealmente independientes característicos del fenómeno, los cuales están modelados de acuerdo con la geometría de las irregularidades observadas (que llamaremos formas de turbulencia), así como una serie de operaciones sobre éstos. En otras palabras un fenómeno de turbulencia se puede definir como:

$$Ft = \langle ft, Op \rangle, ft = \{ft_1, \dots, ft_n\}, Op = \{Op_1, \dots, Op_m \therefore Op_i: ft \times ft \xrightarrow{Op_i} ft\} \quad (1)$$

Donde F_t es el fenómeno de turbulencia, Op es el conjunto de operaciones posibles sobre la base, y el conjunto ft es el conjunto de formas de turbulencia, tales que f_i , $1 < i < n$, corresponden a un conjunto de formas de turbulencia linealmente independientes.

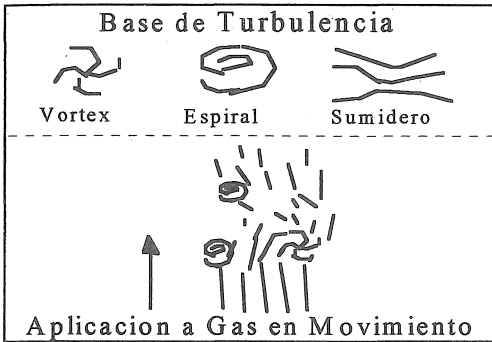


Fig-1. Ejemplo Base de Turbulencia 2D

Cada forma de turbulencia f_i corresponde a un campo de movimiento de manera tal que éste está definido en el espacio por medio de una función dependiente de la velocidad y presión del fluido. Como se trata de aprovechar el conocimiento de la geometría del fenómeno, entonces el campo se puede definir por medio de funciones vectoriales en el espacio, que representan la geometría, son continuas, y en los lugares donde no se encuentra definida se supone que el fluido no es afectado. De esta manera, las operaciones que se realizan para la composición de las diferentes formas de turbulencia se reduce a la composición de funciones vectoriales simples.

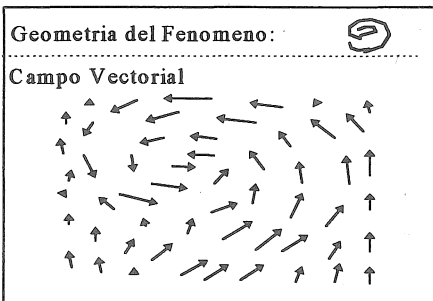


Fig-2. Ejemplo de forma de turbulencia.

Como un campo de movimiento está definido por las variaciones en la velocidad del fluido, y la función de la forma de turbulencia $f(x,t)$ solo indica la trayectoria a seguir por el fluido, entonces las variaciones en la velocidad del mismo están dadas por la segunda derivada de la función. Si a esto además se le adiciona una tasa de disipación k debida a la interacción entre los diferentes modos de velocidad en el campo ocasionado por los cambios de presión, entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \nabla^2 f(x,t) - k * \nabla p(x,t)$$

o lo que es igual:

$$\frac{\partial u(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \nabla u(\mathbf{x}, t) - k * \nabla p(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

Esta ecuación corresponde a un solo campo de los pertenecientes a una base de turbulencia, y tiene como ventaja el que se puede resolver fácilmente por métodos numéricos tradicionales, de manera bastante eficiente debido a que es una ecuación diferencial lineal de primer orden.

De acuerdo a lo anterior se introduce la definición de campos base como aquellos que es posible calcular por medio de una función específica, ya sea Navier-Stokes, Campos Aleatorios, o en el caso de las bases de turbulencia, un campo definido por medio de la ecuación (2).

II. Modelaje de Múltiples Niveles para Campos de Movimiento

La forma de un gas está dada principalmente por la manera como éste interactúa con el medio en el que se desarrolla, es por eso que se debe modelar de alguna manera las irregularidades presentes en el medio que son las que finalmente van a determinar la evolución del gas, estas irregularidades corresponden a los fenómenos de turbulencia. Si se observa con detenimiento el comportamiento de un medio, se puede ver que es fácil realizar una correspondencia directa entre este y un campo vectorial (aquí llamados campos de movimiento). En el caso de los gases estos campos de movimiento son llamados más tradicionalmente campos de viento.

Físicamente, la turbulencia es un conjunto de fenómenos producidos por diversas razones: Obstáculos en el camino del fluido, viento, cambios de presión, etc. Estos fenómenos producen cambios en la velocidad, dirección, y presión del fluido en el espacio-tiempo, esto se representa tradicionalmente en la dinámica de fluidos por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes [STA93][ROG84][CFD95][STR95], que se pueden resolver por medio de diversos métodos numéricos.

Esta aproximación para el cálculo de los campos de movimiento, adolece de varios problemas: En primer lugar, es complicado lograr el efecto deseado por medio de la aplicación de fuerzas externas exclusivamente; y en segundo lugar, las no-linealidades presentes en las ecuaciones las hacen difíciles de resolver numéricamente, especialmente en presencia de turbulencia. Linealizar estas ecuaciones puede mejorar bastante la estabilidad y eficiencia [CFD95][STR95][15], pero puede llegar a disminuir drásticamente la aparición de fenómenos de turbulencia (como en el caso de fluidos viscosos).

En la dinámica de fluidos tradicional, se observa que un campo de movimiento está compuesto por dos niveles de turbulencia, a pequeña y a gran escala. Basándonos en esta

observación se propone un modelo para los campos de movimiento de múltiples niveles extendiendo esta definición de la siguiente manera:

Se supone que un campo de movimiento no base $u(\mathbf{x},t)$, se puede definir como la composición lineal de los dos conjuntos de campos posibles, (gran escala ($U_g(\mathbf{x},t)$) y de pequeña escala ($U_p(\mathbf{x},t)$):

$$u(\mathbf{x},t) = \alpha U_g(\mathbf{x},t) + \beta U_p(\mathbf{x},t), \quad (3)$$

Donde cada una de los conjuntos de campos U_g y U_p corresponden a su vez a composiciones de campos de movimiento así:

U_g es una composición lineal de campos base:

$$U_g(\mathbf{x},t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_{b_i}(\mathbf{x},t), \quad (4)$$

U_p es una composición aleatoria de campos a pequeña escala $u_i(\mathbf{x},t)$:

$$U_p(\mathbf{x},t) = \sum_{i=1}^n u_i(\mathbf{x},t) * \sigma_i * r(\mathbf{x},t), \quad (5)$$

En esta ecuación, σ_i corresponde a la varianza del campo vectorial a pequeña escala $u_i(\mathbf{x},t)$, y $r(\mathbf{x},t)$ corresponde a una función de ocurrencia previamente determinada. Esta función de ruido es la que va a determinar la densidad de aplicación los diferentes campos de movimiento a pequeña escala, y es por medio de esta función, que se agregan irregularidades en la aparición y aplicación de los fenómenos turbulentos, para lograr un mayor realismo.

Cada uno de los campos a pequeña escala $u_i(\mathbf{x},t)$ corresponde a un campo vectorial no base, de manera que por la definición de campo entonces todos los u_i se definen como:

$$u_i(\mathbf{x},t) = \alpha U_{g_i}(\mathbf{x},t) + \beta U_{p_i}(\mathbf{x},t), \quad (6)$$

De esta manera la definición de un campo esta dada por un árbol n-ario de composición de campos con m niveles de profundidad, la definición recursiva de esta función termina cuando para todos los u_i de un nivel m determinado los U_{p_i} corresponden a un conjunto vacío, es decir solo esta definido por los U_{g_i} (composición lineal de campos base).

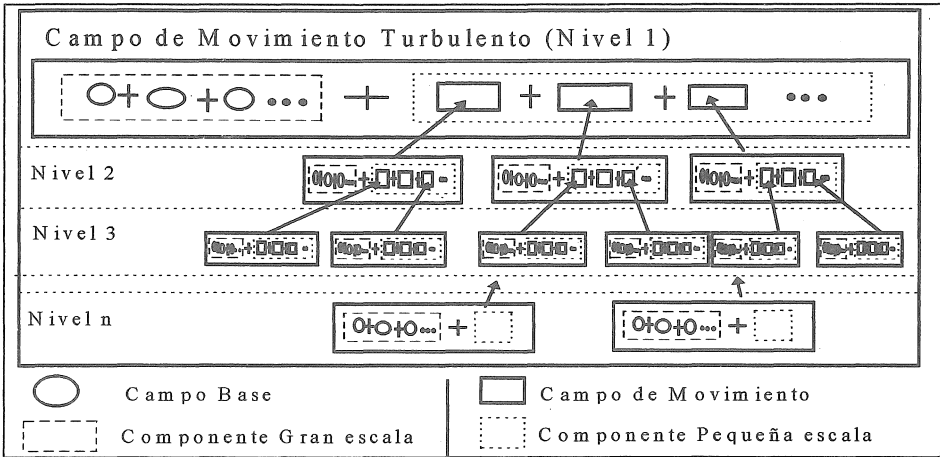


Fig-3. Modelo de Campos de Movimiento por Niveles.

III. Evolución de los Fenómenos de turbulencia en el espacio-tiempo

Tradicionalmente el manejo del tiempo en la simulación de fenómenos turbulentos se toma como una evolución temporal determinística (hipótesis de Taylor), mientras que aquí la evolución del tiempo con respecto al espacio va a corresponder a un proceso estocástico, el cual afecta de manera directa la evolución espacial del fenómeno para cada instante de tiempo.

Como se menciona inicialmente en el modelo de un campo de movimiento turbulento depende de los cambios en la velocidad y presión, así como de fuerzas externas, pero en general un campo de movimiento se define como una función vectorial en el espacio n dimensional donde se encuentra el fluido, si a esto se le agrega el tiempo como una dimensión mas, entonces se logra una mayor libertad en el modelo, a que es posible representar una serie de funciones mas complejas, así como es posible disminuir la complejidad de las funciones de cálculos de la evolución temporal.

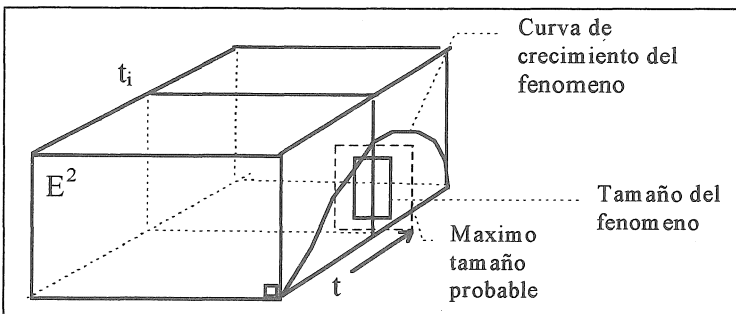


Fig-4 Evolución de un fenómeno en el Espacio-tiempo.

Al introducir el tiempo como una dimensión adicional se puede utilizar este para controlar la definición de los múltiples niveles de definición en un campo de movimiento turbulento, esto porque no solo controla la aparición de los fenómenos de manera aleatoria, sino que determina el tamaño máximo (definición) del fenómeno turbulento a pequeña escala en un instante de tiempo determinado, permitiendo así el manejo mas simple de los múltiples niveles de definición del campo.

Para manejar el tiempo se define una función de probabilidad de manera que esta permita predecir cuando es el próximo instante de tiempo en el que va a ocurrir un evento de importancia en la simulación, definiendo como evento como los cambios significativos en proceso de simulación como es la aparición de un fenómeno de turbulencia, su desaparición, cambio de tamaño, y en general los eventos de máximo impacto sobre el comportamiento de los campos de movimiento. La ocurrencia de estos eventos corresponde a encontrar los máximos y mínimos de las funciones de definición de tiempo, y campos.

Esto permite que el tiempo se maneje de manera sincrónica con la ocurrencia de eventos, de manera que en la implementación se puede aumentar la eficiencia al tener que calcular únicamente los campos solo en los instantes de tiempo determinados, y generar una interpolación de resultados entre dos eventos de tiempo sucesivos (de todas maneras cabe anotar que la evolución de un fenómeno de turbulencia en un instante dado de tiempo depende de su estado en el instante anterior).

Por lo que la ecuación 5, se puede reescribir así:

$$U_p(\mathbf{x}, t) = \sum u_i(\mathbf{x}, T_i(t)) * \sigma_i * r(\mathbf{x}, T_i(t)) + \sum u_i(\mathbf{x}, t-1) * T_i(t) * \sigma_i, \quad (7)$$

En donde $T_i(t)$ es una distribución de probabilidad en el tiempo, la cual se encarga de definir la evolución de una forma específica de turbulencia en el tiempo, dando los cambios máximos de tamaño de esta desde su inicio, hasta el instante en que desaparece. El segundo termino corresponde a una distribución de probabilidad dependiente del estado del campo en el instante anterior con la inclusión de una función de varianza para modificar el tamaño de los fenómenos presentes en el campo (fig-4).

III. Modelo de un Gas

Físicamente un gas corresponde a un conjunto de partículas, pero esto requiere de una gran cantidad de partículas, para lo cual se necesitaría un poder computacional bastante grande para su manejo (en el caso que este sea posible). En cambio resulta mucho mas practico el hecho que todo sistema de partículas tiene asociada una función de densidad en el espacio-tiempo $\rho(x,y,z,t)$, la cual puede estar definida de manera determinística o estocástica, y se encuentra definida para todo el espacio, cuya evolución esta dada por una ecuación de Avesión-Difusión (A-D)[AVE89][STA93][15] a la cual se le ha adicionado un termino de disipación $\alpha(\rho,t)$ dependiente del tipo de gas a modelar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{u} \nabla \rho + \kappa \nabla^2 \rho - \alpha(\rho, t) \quad (8)$$

El primer termino en el lado derecho es el termino de avección, el cual es el encargado de involucrar los efectos del movimiento del gas, asumiendo que el gas tiene un vector de movimiento \mathbf{u} dependiente del tiempo. El segundo termino calcula la difusión molecular a una rata κ . Y el tercer termino corresponde a la disipación de la densidad.

Se asume además que las partículas no tienen efecto en el medio, por lo que todo el movimiento de las mismas esta dado exclusivamente por su localización y por el efecto que este tenga sobre las mismas. De tal manera que es la combinación de esta función de densidad con los diferentes modelos de los fenómenos de turbulencia la que va a simular la interacción del gas con el medio determinando así la evolución del mismo a lo largo del tiempo que es lo que en resumen nos interesa.

IV. Interacción Entre el modelo de Turbulencia y el de Gases

La interacción entre el modelo de un gas y el modelo de los fenómenos de turbulencia es la que al final nos permite visualizar los efectos de estos fenómenos sobre los objetos naturales, como en el humo, las nubes, etc.

En la ecuación 8 donde se define un gas como una distribución de densidad, se descubre que basta con reemplazar las funciones de velocidad y presión por las definidas por el campo de movimiento (\mathbf{u} y p), con el que interactua el gas. Pero si bien esto produce resultados de manera muy directa, la solución a esta ecuación para campos complejos, se vuelve rápidamente prohibitiva tanto en tiempo computacional como en memoria. Entonces para poder obtener los mismos resultados sin este problema se puede realizar de la siguiente manera[STA93][15]:

Se supone que la distribución de densidad es una suma balanceada de una distribución simple f :

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^n m_i(t) * f(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i(t)\|, t - t_i) = \sum_{i=1}^n \rho_i(\mathbf{x}, t), \quad (9)$$

En otras palabras la distribución de densidad es una "burbuja difusa", con una función de campo dependiente del tiempo f , donde $\mathbf{x}_i(t)$ es el centro de masa, t_i es el tiempo al que la "burbuja" ρ_i es creada, y $m_i(t)$ es su masa. Si se supone que f es una distribución gaussiana con una desviación estándar σ_0 mucho mas pequeña que la escala mas pequeña en el campo de movimiento, el campo se puede suponer constante en cada burbuja.

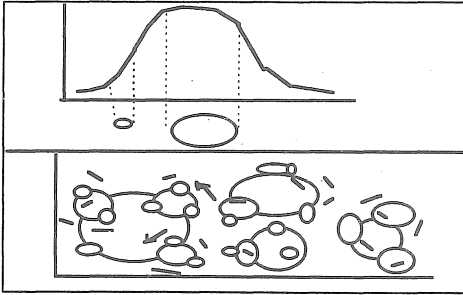


Fig-5. Distribución de densidad como burbuja difusa, (El tamaño se asocia con una discretización de la distribución de probabilidad).

Entonces el termino de aveccion solo mueve la burbuja, pero no deforma su forma, por lo que el movimiento de la burbuja esta dado por la integral de su centro de masa sobre el campo de viento:

$$x_i(t) = x_i(t_i) + \int_{t_i}^t u(x_i(s), s) ds, \quad i=1, \dots, n, \tag{10}$$

Y la deformación de su forma esta dada por el termino de difusión. Aquí cabe notar que la difusión a una tasa κ después de un tiempo $t-t_i$ de una gaussiana con varianza σ_0^2 es equivalente a la convolución de una gaussiana con varianza $\kappa(t-t_i)$ con una gaussiana de varianza σ_0^2 . Como las gaussianas son cerradas bajo convolución[AVE89][15] la gaussiana resultante tiene una varianza $\sigma_i^2(t) = \sigma_0^2 + \kappa(t-t_i)$, y:

$$f(r, t-t_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_i^3(t)} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_i^2(t)}\right), \tag{11}$$

Entonces f se difumina hacia afuera con una varianza $\sigma_i^2(t)$ que aumenta con t . El factor de normalización $(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_i^3(t)$ garantiza que la masa de la burbuja es invariante bajo difusión. Una vez la varianza de una burbuja se vuelve comparable a la escala mas pequeña del campo de movimiento entonces se puede reemplazar por burbujas mas pequeñas y distribuir la masa igualmente entre ellas. El efecto del termino de disipación es una disminución exponencial de las masas sobre el tiempo:

$$m_i(t) = m_0 * \exp(-\alpha(t-t_i)), \tag{12}$$

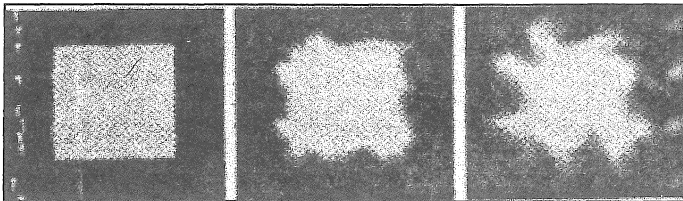


Fig-6. Evolución de una Distribución de Densidad

V. Modelo Computacional de un Sistema para el modelaje y simulación de fenómenos turbulentos.

V.1. Consideraciones del Diseño del Sistema

Con base en la fundamentación teórica presentada se propone un modelo computacional para un sistema para el cálculo de estos fenómenos, basándose en consideraciones como:

- **Desempeño:** Como lo que se desea es el poder obtener imágenes que muestren estos fenómenos de manera bastante creíble para poder aumentar la sensación de realismo en imágenes generadas por computador, y como también se desea que los resultados se puedan aplicar en aplicaciones interactivas, entonces se debe reducir al máximo la complejidad de las ecuaciones a resolver, también debe ser posible controlar el nivel de definición de los resultados, y la suavidad de la simulación, así como el poder cambiar las características del modelo de turbulencia si esto mejora el desempeño. Esto se logra mediante la utilización de bases de turbulencia, y de manejo de tiempo por medio de procesos estocásticos, así como por medio del modelo de múltiples niveles.
- **Ortogonalidad:** Como se desea poder cambiar las características del modelo de turbulencia, debe ser posible que en el caso que esto se realice no ocurran efectos colaterales en otras características, como por ejemplo cambiando el modelo de un nivel de bases de turbulencia a dinámica de fluidos.
- **Interoperabilidad:** Debe ser posible el integrar este sistema de simulación de estos modelos con otros sistemas tanto de simulación como con diferentes sistemas de visualización, de manera que partes de este sistema se puedan incluir en otro, o viceversa.
- **Complejidad:** Se debe poder tener acceso a toda la funcionalidad del sistema sin importar las características específicas de implementación de las diferentes partes del sistema.
- **Extensibilidad:** Debe ser posible extender la funcionalidad del sistema, de manera fácil, sin afectar la integridad del mismo.

V.2. Diseño del Sistema

El sistema de simulación gira en torno a la representación del estado del proceso en simulación el cual está representado por el modelo de niveles, en cada nivel tenemos un conjunto de "burbujas" propuesto por el modelo de gases y un conjunto de definición de campos asociado a cada burbuja propuesto por el modelo de turbulencia. Por supuesto cada nivel es el resultado de la evaluación de sus niveles inferiores.

La sofisticación del proceso de evaluación depende de cuantos niveles se tomen en cuenta. En resumen, existe un anillo de procesos que, conjuntamente pueden simular el proceso de evolución de un fluido en presencia de fenómenos de turbulencia. Ellos son Modelo Turbulencia, Modelo Gas, Visualización, Modelo del Tiempo. Existen obviamente procesos de apoyo como: Solucionador de Ecuaciones (se pueden utilizar procesos externos como

programas especializados para el manejo de estos datos p.ej. mathematica, etc.), Manejo de persistencia, etc.

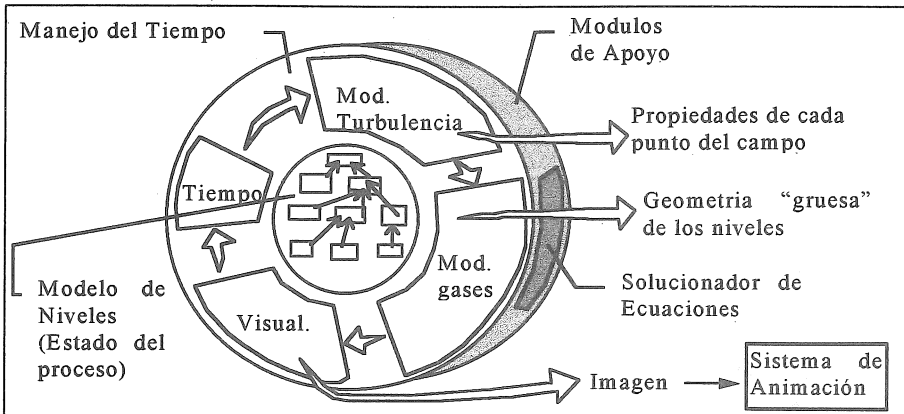


Fig-7. Diseño del sistema de Simulación (El sistema gira alrededor de la representación del estado del proceso en simulación).

VI. Visualización

Se han definido dos modos de visualización de los datos producidos por la simulación dependiendo del modelo de iluminación que se utiliza (para el nivel de realismo), así como considerando eficiencia en la obtención de los resultados. En general ambos modelos están basados sobre las técnicas tradicionales de ray-tracing [EBE94][FOL92][STA93][REE85], pero con diferentes modelos de iluminación, así como técnicas de optimización especiales para cada uno.

En ambos modelos se supone que el gas está compuesto por burbujas difusas de diferentes tamaños dependiendo de la densidad del gas y de los niveles de turbulencia. El primer modelo de visualización el cual llamamos de visualización temprana o para visualización interactiva, corresponde a un modelo simple de ray-casting para la generación de las imágenes, en el cual solo se realiza un chequeo de intersección del rayo con la frontera de las burbujas, y no se contemplan fenómenos como difracción o reflexión los cuales desvían el rayo permitiendo optimizar la velocidad del algoritmo de intersección por medio de métodos de clustering [EBE94][STA93], en este modelo se incluye el fenómeno de atenuación de la luz dando un coeficiente de atenuación para cada burbuja (burbujas-semitransparentes). Este modelo genera imágenes aproximadas de manera muy eficiente, lo cual permite controlar el sistema de manera más interactiva.

El segundo modelo de visualización o modelo de visualización final, incluye modelos de iluminación mucho más reales, así como fenómenos comúnmente asociados con los gases como refuerzo, emisión de luz, y mejora el modelo de intersección al incluir difracción y reflexión, lo que afecta el rayo haciendo que este cambie de dirección y no se debe calcular

el efecto de la burbuja solo en la frontera, sino también en su interior. Este modelo genera imágenes bastante reales, pero a un costo computacional alto, es por eso que este solo debe ser utilizado para la producción de resultados finales de la simulación una vez que se ha afinado el comportamiento de la misma utilizando el otro modelo de visualización.

VII. Conclusiones

El modelo por medio de bases de turbulencia disminuye apreciablemente la complejidad de los métodos normalmente utilizados para el modelaje de los fenómenos turbulentos (Navier-Stokes), además permiten que el usuario del sistema tenga un mayor control sobre lo que desea aparezca en la simulación.

El modelaje por niveles de los campos de movimiento, permite manejar la fineza de la solución, al utilizar solo los niveles que se desee, sin necesidad de tener que calcular las ecuaciones para todo el sistema. También permite la utilización de diferentes métodos de modelaje de campos base, de tal manera que se pueden adaptar métodos tradicionales de modelaje (Navier-Stokes, Campos Aleatorios) eliminando las irregularidades que se introducen en las ecuaciones facilitando su solución, así como el poder combinar diferentes métodos.

El sistema de modelaje de tiempo por medio de procesos estocásticos permite manejar el tiempo de manera más activa, logrando obtener mejores resultados en la simulación ya que se maneja el tiempo de manera más adaptativa permitiendo obtener resultados más suaves en la simulación. Este sistema de modelaje se ve reflejado en el modelo computacional del sistema en donde se manejan los procesos por medio de un anillo controlado por el tiempo, lo que además facilita la distribución de procesos.

El sistema actualmente se encuentra en proceso de implementación utilizando un esquema cliente-servidor sobre un computador Cray y computadores Alpha, separando los procesos de modelaje y cálculo de la simulación (los cuales se están implementando en el Cray aprovechando la capacidad de procesamiento en paralelo), y el proceso de visualización (implementado en los Alpha).

Bibliografía

- [EBE94] David S. Ebert, F. Kenton Musgrave, Dan Peachey, Ken Perlin, Steve Worley, "Texturing and Modeling a procedural approach", Academic Press Inc., Cambridge MA, 1994.
- [AVE89] Law Averill M., David Kelton, Simulation Modeling and Analysis, 1989.
- [FOL93] J.Foley, A. vanDam, S. Feiner, J. Hughes, Computer Graphics Principle and Practice, USA, Addison Wesley, 1992.
- [STA93] Jos Stam, Eugene Fiume, Turbulent Wind Fields for Gaseous Phenomena, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'93), August 1993.
- [KAS90] M. Kass and G.Miller. "Rapid, Stable Fluid Dynamics for Computer Graphics", ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'90), August 1990.

- [ROG84] R.S. Rogallo and P.Moin., Numerical Simulation of Turbulent Flows, Annual Review of Fluid Mechanics, 1984.
- [CFD95] Computed Fluid Dynamics Journal, IEEE Press, January-December 1994, January April, 1995.
- [REE85] Reeves, W.T., and R. Blau, Aproximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Particle Systems, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'85).
- [WIT87] Witkin, A., K. Fleischer, and A. Barr, Energy Constraints on Parametrized Models, ACM Computer Graphics (SIGGRAPH'87).
- [HAR86] Hartnell Tim, Replicating Reality: Exploring Computer Simulations, Ed. Anaya Multimedia, 1986.
- [STR95] Streeter Victor L., Mecanica de los Fluidos, Colombia, McGraw Hill, Octava Edición, 1995.
- [BAR951] Barrero Daniel, Metodologia de Modelaje Multinivel para Fenomenos de Turbulencia. UniAndes, 1995.
- [BAR952] Barrero Daniel, Modelaje y Simulación de Fenomenos Turbulentos - Bases de Turbulencia, UniAndes, 1995.
- [APO86] Apostol, Tom M., Calculus volumen 2, España, Editorial Reverté S.A., 1986.