

Lo Continuo y lo Discreto, una discusión desde el movimiento browniano.

Cesar Alberto Zarate Monroy

Asesor: José Francisco Malagon Sánchez

Programa de Licenciatura en Física

La enseñanza de las Ciencias desde una Perspectiva Cultural

Bogotá, D.C.

2013

<b>1. Información General</b>	
<b>Tipo de documento</b>	Trabajo de grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	LO CONTINUO Y LO DISCRETO, UNA DISCUSION DESDE EL MOVIMIENTO BROWNIANO
<b>Autor(es)</b>	Cesar Alberto Zarate Monroy
<b>Director</b>	José Francisco Malagón
<b>Publicación</b>	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional, 2013. 58 p.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional
<b>Palabras Claves</b>	Continuo, Discreto, Movimiento Browniano, Atomismo, Energetismo, Átomo, Einstein, Perrin

<b>2. Descripción</b>
<p>En enseñanza de las ciencias, en la presentación de la teoría atómica, este trabajo considera que un análisis alrededor sobre el significado de pensar en “átomos” puede ser un camino útil a la hora de plantearse un camino para hacer “evidente” esta forma de ver los fenómenos físicos.</p> <p>La teoría atómica de la materia no es la única teoría alrededor de los fenómenos (por ejemplo la termodinámica), existe otra teoría que tenía un objeto ontológico distinto y esta es la corriente energetista de las ciencias. Sus objetos ontológicos eran antagonistas, el problema de si el calor era una forma (continua de la energía) o si era el resultado de la agitación de los átomos de la materia era un problema que debía ser atendido por los experimentadores, quienes debían encontrar en la naturaleza una prueba experimental que ayudara a entender la visión de mundo que debería ser elegida, ya que dependiendo de la capacidad explicativa se eligen las teorías, desde el punto de vista de este trabajo.</p> <p>Esta experiencia es el movimiento browniano, fenómeno que solo podía ser explicado desde la teoría cinético-molecular de la materia, formulada por Boltzmann entre otros y en la cual Einstein baso sus análisis para poder dar una explicación coherente con la experiencia y con las comprobaciones experimentales realizadas por Jean Perrin.</p> <p>El trabajo construye un contexto problemático alrededor de los problemas de lo continuo, lo discreto, como se evidencian estos problemas en el pensamiento y en las ciencias. Mostrando la importancia del movimiento browniano en la argumentación de la teoría atómica de la materia y</p>

señalando su importancia para la física.

Todo lo anterior, constituye desde el punto de vista de este trabajo, una herramienta fundamental y útil para la enseñanza de la teoría atómica de la materia, por eso es llevado a cabo una pequeña prueba piloto en el aula de clases para tratar de evidenciar algunas de las fortalezas o debilidades que puede tener la aplicación de esta experiencia en estudiantes de grado decimo y undécimo.

### 3. Fuentes

Alvarez, C., & BARAHONA, A. (2002). Introducción. En *LA CONTINUIDAD EN LAS CIENCIAS* (pág. 14). Mexico D.F: Fondo de Cultura economica.

Alvarez, C., & BARAHONA, A. (2002). Introducción. En *LA CONTINUIDAD EN LAS CIENCIAS* (pág. 14). Mexico D.F: Fondo de Cultura economica.

Alvarez, C., & BARAHONA, A. (2002). *La continuidad en las ciencias*. Mexico D.F: Fondo de Cultura economica.

Aristóteles. (1995). *Física*. (G. R. Echandia, Trad.) Gredos S.A.

Bohr, N. (1949). *Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*. Recuperado el 15 de 9 de 2013, de marxists.org: <http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/dk/bohr.htm>

Boltzmann, L. (1986). Sobre la energética. En *ESCRITOS DE MECANICA Y TERMODINAMICA* (págs. 102-106). Madrid: Alianza.

Boltzmann, L. (1986). Sobre la inevitabilidad del atomismo en las ciencias de la naturaleza. En *ESCRITOS DE MECANICA Y TERMODINAMICA* (págs. 107-125). Madrid: Alianza.

Brown, R. (1827). A BRIEF ACCOUNT OF MICROSCOPICAL OBSERVATIONS made in the monts of june, july and august, 1827 ON THE PARTICULES CONTAINED IN THE POLEN OF PLANTS AND ON THE GENERAL EXISTENSE OF ACTIVE MOLECULES IN ORGANIC AND INORGANIC BODIES.

Dedekind, R. (1927). *CONTINUIDAD Y NÚMEROS IRRACIONALES*. (J. J. Bares, Trad.)

Einstein, A. (2001). *Einstein 1905 un año milagroso*. (J. Stachel, Ed., & J. G. Sanz, Trad.) Barcelona, España: CRÍTICA.

Galilei, G. (1995). *DIALOGO SOBRE LOS DOS MAXIMOS SISTEMAS DEL MUNDO PTOLEMAICO Y COPERNICANO*. Madrid: ALIANZA EDITORIAL.

Golzález, A. M. (2006). Atomismo versus Energetismo controversia científica a finales del siglo XIX. *Historia y Epistemología de las ciencias*, 411-428.

Leibniz, W. G. (1894). *Monadología y discurso de metafísica*. (S. A. Aguilar, Trad.) Madrid: SARPE.

Machado, O. L. (2009). *Ontology Studies*. Recuperado el 12 de 8 de 2013, de <http://www.ontologia.net/studies/>

Nelson, E. (2001). *Dynamical Theories of Brownian Motion*. Princeton University Press.

Ostwald, W. (1911). *La Energía*. Madrid: Librería Gutenberg de José Ruiz.

Perrin, J. (2005). *Brownian Movement And Molecular Reality*. (F. SODDY, Trad.) New York: Dover Publications.

Poincare, H. (1913). *Ultimos Pensamientos*.

Restrepo, M. L. (17-18 de Febrero de 2005). *ALBERT EINSTEIN Y EL MOVIMIENTO BROWNIANO*. Obtenido de Universidad Del Valle: [http://www.univalle.edu.co/~fisica/coloquio/Movimiento\\_Browniano.pdf](http://www.univalle.edu.co/~fisica/coloquio/Movimiento_Browniano.pdf)

REYES, J. D. (s.f.). LA ORGANIZACIÓN DE LA EXPERIENCIA Y LA ELABORACIÓN DE CONCEPTOS.

Uribe, F. V. (2006). Albert Einstein Una explosión de genialidad. *Revista Escuela Colombiana De Ingeniería*, 32-39.

#### 4. Contenidos

El trabajo consta de 4 capítulos que se describen a continuación:

**Sobre lo continuo y lo discreto:** En este capítulo se muestran algunos de los problemas que las visiones de continuo y discreto presentan en el pensamiento humano, algunos aspectos alrededor de las descripciones de los fenómenos. Intentando evidenciar por que se elige una u otra de estas visiones en la matemática y en a física.

**Atomismo vs energetismo:** En este capítulo se muestra la discusión entre los energetistas y atomistas, dos corrientes científicas que se diferenciaban en el objeto ontológico de la ciencia y que estaban en contraposición y que fue decidida por el movimiento browniano.

**El movimiento browniano:** En este capítulo se desarrolla lo comprendido por el movimiento browniano, desde su descripción por Robert Brown en 1827, hasta la comprobación experimental de Jean Perrin de la solución teórica de Einstein en 1909.

**El movimiento browniano en el aula:** Después de las descripciones realizadas en los capítulos anteriores, se propone el diseño e implementación de una pequeña actividad sobre el movimiento browniano en el aula, sobre la descripción, los análisis y resultados de esta actividad trata este capítulo.

## 5. Metodología

El trabajo tiene un corte Historico-Critico, se realiza un recorrido histórico por algunos de los autores que tratan el tema de estudio, más que un barrido histórico, es un análisis, una reflexión y una reconstrucción de las ideas planteadas, además de su posible papel en la enseñanza del tema de estudio, específicamente en la teoría atómica de la materia.

## 6. Conclusiones

Después de realizar las reflexiones, el estudio sobre los diferentes problemas necesarios, y la posterior aplicación de la prueba de movimiento browniano en el aula de clases, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El trabajo logró construir un contexto problemático y argumentativo, en este caso alrededor de dos cosmovisiones de la física, la energetista y la atomista, brindando argumentos a favor de la teoría atómica de la materia. Señalando la importancia del movimiento browniano para esta discusión y para la física en general.
2. Plantear los problemas sobre lo continuo y lo discreto es una herramienta útil para los docentes, pues muestra problemas que se pueden presentar en la formulación de experiencias desde las diferentes perspectivas. Y puede ayudar a mostrar una forma distinta del cambio de mirada, basado en la necesidad explicativa y la argumentación.
3. Plantear las controversias científicas, muestra mucho de cómo funciona la sociedad científica, en este caso, muestra como una teoría es elegida sobre otra, no porque sea la “mejor”, sino porque muestra un marco explicativo más amplio de los fenómenos de la naturaleza.
4. El movimiento browniano constituye un argumento experimental fácilmente observable de la teoría cinético molecular del calor, gracias a esto puede constituir una herramienta fundamental en la enseñanza de la teoría atómica de la materia.
5. El movimiento browniano permitió que los estudiantes generaran explicaciones con cierta similitud a las formuladas por Brown, esto muestra que estas no están alejadas de la descripción del fenómeno realizada por los científicos y por ende, muestra que este experimento permite generar formas explicativas dentro de los estudiantes que apuntan a una visión atómica de la materia.

Aunque el experimento logró un primer acercamiento a las explicaciones y descripciones en los estudiantes, es claro que una implementación más extensa de esta experiencia y con una mayor variedad en el trato de las variables implicadas, podría mostrar resultados aún más interesantes sobre las explicaciones realizadas por los estudiantes y podrían afinar su argumentación alrededor de la teoría atómica de la materia.

<b>Elaborado por:</b>	Cesar Alberto Zarate Monroy
<b>Revisado por:</b>	José Francisco Malagon

<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	5	12	2013
--	---	----	------

## Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer a mi familia en especial a mi madre por todo el apoyo incondicional, superando las adversidades que se presentaron durante este proceso siempre apoyándome y creyendo en mí.

A los que considero mis formadores académicos, a los docentes que me guiaron todo este tiempo, en especial a la profesora María Mercedes Ayala, los profesores José Francisco Malagón (con quien estaré siempre agradecido por haber asesorado mi trabajo de una manera impecable), al profesor John Barragán y por último a la persona que ayudo en mi formación al profesor Manuel Antonio Ríos, y a todos mis maestros a lo largo de este camino académico que apenas emprendo.

Por último pero no menos importante a todos mis compañeros y amigos que me acompañaron y apoyaron a lo largo de este duro proceso, no solo por las adversidades que contiene la academia para el estudiante, sino para los obstáculos que la vida misma pone en el camino, a todos ellos muchas gracias sin su apoyo no habría podido llegar tan lejos.

*Se tranquilo y sereno ante las adversidades, si las cosas se consiguieran fácilmente, la vida no sería interesante*

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1 SOBRE LO CONTINUO Y LO DISCRETO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 SOBRE EL PROBLEMA DEL MOVIMIENTO .....</b>	<b>14</b>
1.1.1 EL PROBLEMA DEL PUNTO .....	17
<b>1.2 SOBRE EL PROBLEMA DEL INFINITO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 SOBRE LA DIVISIBILIDAD DE LA MATERIA.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 2. ATOMISMO VS ENERGETISMO.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 OSTWALD VS BOTLZMANN, UNA CONTROVERSIA SOBRE LA NATURALEZA DE LOS FENOMENOS. .</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 3. EL MOVIMIENTO BROWNIANO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 LA PRIMERA DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO BROWNIANO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 TRABAJOS Y APORTES ANTERIORES A EINSTEIN .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 EINSTEIN Y EL MOVIMIENTO BROWNIANO .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Ley de Van't Hoff ´ para la presión osmótica .....	41
3.3.2 Ley de Fick para la difusión .....	43
3.3.3 Ley de Stokes.....	44
<b>3.4 EL TRABAJO EXPERIMENTAL DE JEAN PERRIN .....</b>	<b>46</b>
<b>CAPITULO 4. EL MOVIMIENTO BROWNIANO EN EL AULA.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3 RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS ACTIVIDADES .....</b>	<b>55</b>
4.3.1 Caracterización del fenómeno .....	55
4.3.2 Construcción de variables y explicaciones .....	57
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>62</b>

# INTRODUCCIÓN

La teoría atómica de la materia ha permitido explicar una gran cantidad de fenómenos y experiencias encontradas en la naturaleza, no obstante, su enseñanza y su trasfondo (que discretiza la materia a unidades “indivisibles”) no permite a los estudiantes de las instituciones de enseñanza media y superior construir una necesidad de una visión discreta de la naturaleza. En otras palabras, se entiende el átomo como una estructura “correcta” de la materia muchas veces dejando un lado los argumentos alrededor de esta construcción explicativa

La teoría atómica es una visión de los fenómenos que requería de unidades indivisibles para su explicación, ejemplo de esto es la termodinámica molecular, en la que Boltzmann trabajó, teniendo como objetivo la explicación de los procesos irreversibles y más aún fue su objetivo y el de su trabajo lograr una explicación de la irreversibilidad de los fenómenos a partir de la segunda ley de la termodinámica desde una perspectiva mecánica.

Esta es la problemática que desea abordar este trabajo, mostrar a los estudiantes que la teoría atómica de la materia no es la única, ni la verdadera construcción explicativa que se puede crear sobre algunos fenómenos de la naturaleza y profundizar en su comprensión sobre el significado de discretizar los cuerpos. más aun mostrar que esta teoría no es tan antigua como se cree, esta es aceptada hasta 1909 con el libro *Les Atomes* de Jean Perrin que reúne muchas de las experiencias que hasta la época, solo podían ser explicados desde esta teoría, desde este punto de vista.

Esta forma de ver el mundo no puede ser enseñada como una presentación de modelos, ya que contiene toda una base filosófica y experimental que este trabajo pretende mostrar pueden ayudar a mejorar la comprensión sobre la idea misma del átomo y su significado en la naturaleza, no centrándonos en los espectros atómicos, que es una de las experiencias que mostró la utilidad de la idea de átomo, sino centrándonos en el movimiento browniano, otra de las experiencias que fueron explicadas desde la propuesta de la materia como un ente discreto.

En el capítulo 1. Se hará una breve reflexión sobre los problemas que plantean lo continuo y lo discreto para el pensamiento humano y algunos de los problemas que

sugiere la formalización de estos conceptos y su uso en muchas de las explicaciones dentro de los fenómenos físicos.

Desde el contexto de la física, el significado de la línea, del punto y del campo, etc. Además de la formalización de los fenómenos, han sido puntos neurálgicos en las discusiones sobre la naturaleza de los fenómenos y de los modelos construidos por las personas que describen el mundo. Debido a esto primero será necesario entender que se significaran “continuo” y “discreto” en este trabajo.

Será necesario además realizar explicaciones sobre el concepto mismo de infinito, y su significado dentro de las explicaciones de los fenómenos y más aún sobre el mismo pensamiento humano, ya que infinitamente pequeño e infinitamente grande son conceptos que pueden parecer fácilmente entendibles, pero que nos engañan fácilmente ya que dependiendo de su uso podemos movernos dentro del marco de lo continuo al marco de lo discreto sin percatarnos de este cambio de pensamiento.

Después de caracterizar algunas de las ideas y significados sobre lo continuo y lo discreto podremos pasar a un fenómeno o a un problema en concreto para hacer clara la discusión, por eso será necesario contextualizarla desde la perspectiva de los atomistas y los energetistas, este debate en muchos casos desconocido, fue muy importante para la ciencia y específicamente para el desarrollo del atomismo, pues fue la discusión en la que se puso en entredicho la existencia de esta forma de la naturaleza.

En el capítulo 2. Será mostrado por que este es uno de los puntos más importantes de esta discusión y que de alguna forma muestra la profundidad de la misma, es la definición del calor. Desde la definición de los energetistas, la energía era una sustancia, algo real y el calor como forma de energía, una sustancia, mientras que por el lado de Boltzmann la definición del calor como la fricción entre los átomos planteaba una contradicción muy amplia entre las dos teorías, debido a esto comenzó a señalarse el átomo como una entidad metafísica que no podía ser comprobada y que no aportaba a las explicaciones.

Boltzmann por su parte fue un poco más diplomático en el sentido científico de la palabra, pues aunque creía firmemente en sus teorías nunca respondió de la misma forma a los ataques de la escuela energetista alemana, solo se limitó a mostrar la validez de sus argumentos y a mostrar las dificultades y ventajas del pensamiento atómico en

las ciencias. No obstante una de sus teorías, sugería firmemente que de acuerdo con la teoría molecular y la termodinámica, debería existir un movimiento aleatorio de partículas. Boltzmann desconocía alguna experiencia o montaje para poder demostrar este punto de su teoría, sin saber que este fenómeno ya había sido descubierto muchos años atrás, el misterioso movimiento browniano el cual será el objeto de estudio del capítulo 3.

El movimiento browniano había sido descubierto muchos años antes, en 1827 el botánico escocés Robert Brown, publica un artículo llamado "*A BRIEF ACCOUNT MICROSCOPICAL OBSERVATIONS. on the particles contained in the pollen of plants and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies*" en el cual describe una extraña observación en la cual las partículas de polen suspendidas en agua parecen tener un movimiento "voluntario" ya que no puede ser tratado de una manera determinista (no se puede predecir el movimiento de una partícula de polen suspendida en agua) y se atribuye el movimiento a la existencia de moléculas activas en las partículas de polen.

Este problema aparentemente de la biología es trasladado a la física cuando Brown repite las observaciones de con materiales inertes obteniendo los mismos resultados. De revisar los documentos originales de los diferentes autores que trataron el movimiento browniano permite encontrar las problemáticas y las preguntas que ellos plantearon a la hora de explicar el fenómeno.

Einstein, aceptando la suposición de Boltzmann, construyó un tratamiento teórico sobre este fenómeno desde la mirada de la teoría cinético-molecular de la materia, mostró que podría ser observable en cualquier partícula suspendida de un tamaño determinado.

Aunque Einstein reconocía que su trabajo parecía idéntico a la experiencia con movimientos brownianos, los datos experimentales de la época no le daban confianza en este sentido. Hasta 1909, Perrin lograría mediciones que se acomodarían a las predicciones de Einstein, además de realizar un estudio completo del fenómeno.

Esta explicación (discreta) del fenómeno, permite plantear problemas, inquietudes y experiencias que pueden ser utilizadas en el aula de clase para la enseñanza de la teoría discreta de la materia, aprovechando la facilidad experimental que tiene el movimiento browniano para ser repetido en el aula de clases.

Finalmente en el capítulo 4. Será realizado un análisis de las posibles implicaciones argumentativas del contexto anteriormente construido para la enseñanza de las ciencias, específicamente de la teoría atómica de la materia desde una perspectiva no electromagnética (sin decir que esta esté equivocada), planteando actividades para la enseñanza de la teoría atómica, como una necesidad de cambio en la visión del mundo y de las experiencias para la explicación de los fenómenos físicos, utilizando un pequeño instrumento que permite evidenciar de una manera macroscópica la explicación planteada por Einstein para el movimiento browniano.

# CAPÍTULO 1.

## SOBRE LO CONTINUO Y LO DISCRETO

Las preguntas sobre el significado de lo continuo y de lo discreto, siempre se encontraran presentes en todas las formas del pensamiento humano, así mismo con un minucioso ejercicio de reflexión y revisión puede ser posible encontrarlas en todas las ciencias naturales desarrolladas por el hombre. En este capítulo serán estudiados algunos ejemplos que serán de utilidad para identificar como surgen estas preguntas dentro de las ciencias naturales y la matemática; serán identificados los problemas que pueden presentar estas dos ideas dentro del pensamiento humano, mostrando algunas posibles soluciones que han sido planteadas. De este modo, se busca que estas ideas y problemas puedan ser identificadas cuando se presenten de nuevo en los capítulos que siguen a este trabajo.

El primer problema que será analizado es de alguna forma el más común para todos nosotros, ya que es el que observamos todos los días, es decir, el más cotidiano. **El problema del movimiento.**

Así llamaremos al análisis sobre algunas características y propiedades normalmente asignadas al movimiento. Se dice en muchos ejemplos que el espacio es infinitamente divisible, uno de ellos, la paradoja de *Aquiles y la tortuga*. Utilizada por Zenón de Elea para criticar la propuesta de Aristóteles del espacio.

Este es el segundo problema que deberá ser tratado. Es **el problema del infinito**, pues deberá ser aclarado que significa la palabra infinito y qué implicaciones tiene, será necesario analizar problemas de representación del infinito dentro de la mente humana y las diferentes salidas que pueden ser encontradas en la solución del mismo.

No obstante el espacio no es la única cantidad que se ha considerado infinitamente divisible, pues la materia, es decir la entidad física de las cosas con las que interactuamos día a día ha sido de la misma forma considerada como divisible al infinito. **La divisibilidad de la materia** será otro de los problemas que serán abordados en el primer capítulo ya que es uno de los más interesantes para este trabajo, no obstante

la materia ha sido también considerada como compuesta por una unidad indivisible, única en su extensión (no se puede encontrar nada más pequeño), tal vez el átomo de Leucipo o la mónada de Leibniz (Leibniz, 1894) sean ejemplo de estas ideas, será mostrado como aparece la idea de lo indivisible y sus consecuencias en el pensamiento, pero en la necesidad de la comunicación del pensamiento y de las ideas surgen las representaciones y la formalización de las ideas y los conceptos.

En este punto parece que las ideas de lo continuo y lo discreto pueden surgir paralelamente sin ningún conflicto aparente, entonces ¿Cuándo aparece el discreto en oposición al continuo? Esta última pregunta será respondida a lo largo del capítulo, pues considero muy difícil hablar del continuo sin hablar de lo discreto, será mostrado como esta oposición es el motor para el avance de muchas teorías físicas, en mostrar la necesidad de la oposición continuo – discreto dentro del pensamiento y las ciencias en general, será concentrada la última parte de este capítulo.

## 1.1 SOBRE EL PROBLEMA DEL MOVIMIENTO

Gracias a nuestra experiencia cotidiana, podemos crear descripciones sobre los fenómenos en el medio en el que vivimos y con el que interactuamos todo el tiempo, uno de los ejemplos por excelencia de esta interacción es el movimiento, pues desde Aristóteles se ha considerado continuo. Pensemos en el siguiente ejemplo:



Figura 1-1. Línea L

Imaginemos un objeto que va desde el punto A hasta el punto B, y consideremos la línea como el único camino posible, entendiendo la línea desde la siguiente definición: *“el trazado de una línea recta entre de cualquier punto a cualquier punto se sigue de la concepción de la línea como flujo y de la línea recta como su fluir uniforme y sin desviaciones”* Proclo (Alvarez & BARAHONA, La continuidad en las ciencias, 2002) , es difícil pensar que el objeto se haya desplazado desde A hasta B sin cruzar (fluir) por todos los segmentos ubicables dentro de la línea recta, en este sentido tenemos un espacio en el que todos los segmentos de línea tienen otros segmentos de línea en sus vecindades, es decir tenemos un espacio que puede ser considerado contiguo, en

concordancia con su representación a partir de la línea (sin espacio entre sus segmentos). Recordando a Dedekind “Las propiedades que acabamos de subrayar [poner en evidencia] de los números racionales recuerdan a las relaciones reciprocas de posición que existen entre los puntos de una línea recta  $L$ ” (Dedekind, 1927) <sup>1</sup>.

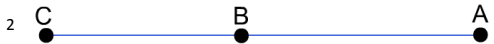
Signifiquemos un poco la afirmación anterior, si a cada número racional es posible atribuirle un lugar o “punto” en una recta, de la misma forma, al conjunto de los números reales debe ser posible hacer la misma distribución sobre la línea, usaré una descripción de las leyes propuestas por el mismo Dedekind para la continuidad en los números reales, la cual (con todo respeto) adaptaré a mi propia versión para señalar los puntos que considero neurálgicos para la discusión.

1. Si  $A, B, C$  son números reales, y  $A > B$  y  $B > C$ , entonces sabemos que  $A > C$ , esto quiere decir que el número  $B$  se encuentra entre  $A$  y  $C$ <sup>2</sup>
2. Si  $A$  y  $C$  son dos puntos diferentes, entonces se dice que existe una cantidad infinita de puntos entre  $A$  y  $C$ .
3. Si  $A$  es un número determinado del conjunto (de los números reales), entonces todos los números del conjunto se subdividen en dos clases y , en donde pueden ser identificados los individuos  $a_1$  (la primera), que son una infinidad de números que se encuentran a la izquierda del punto  $A$ , es decir que todos los números  $a_1$  cumplen con que  $a_1 < A$ .

Y, los individuos de la segunda clase que se encuentran a la derecha del punto  $A$  y cumplen con que  $a_2 > A$ . Como el punto  $A$  puede ser elegido arbitrariamente <sup>3</sup> dentro de los individuos de o para nuestro ejemplo, en cualquier división del conjunto en y , significara que  $A$  o bien es el número máximo de o bien es el número mínimo de , esto significa que los números de la primera clase estarán siempre a la izquierda de los puntos de la segunda clase (  $a_1 < a_2$  ) y la división del conjunto está dada por  $A$ .

---

<sup>1</sup> Si el lector desea profundizar más sobre este concepto se recomienda revisar las primeras 5 partes del libro de Dedekind, ya que realiza una interesante comparación entre la línea y el conjunto de los números racionales y reales.

<sup>2</sup>  esta sería la posición de los números  $A, B, C$  según lo anterior.

<sup>3</sup> Puede ser elegido arbitrariamente por que no se ha puesto ninguna restricción ni condición de valor al número  $A$ .

4. Si el conjunto de todos los números reales se subdivide en dos clases “ $R_1$ ” y “ $R_2$ ” existe solo un número A que determina esa división.

De las siguientes leyes y en comparación a la posición podemos obtener algunas conclusiones interesantes. De 1 podemos concluir que para nuestra línea si el movimiento (como cambio de posición) es de A hasta B y B está a la derecha de A entonces  $B > A$ , por lo tanto podemos decir que el cuerpo está avanzando, de 2 podemos concluir que si una línea representa la diferencia entre los valores A y B, esta línea debe ser densa, en otras palabras, para ir de A hasta B hay que pasar por todos los números infinitos que existen entre A y B y están representados en la recta. En el caso de 3 es la distinción más importante ya que es la que define el número A como una cortadura del sistema R representado en la línea, es decir en número A tiene el valor que le asignemos arbitrariamente, pero en atributo A siempre será o el máximo de  $a_1$  o el mínimo de  $a_2$ .

La importancia de definir al número A como una cortadura del sistema estará dada por su atributo, he aquí la importancia de este concepto, ya que si consideramos que la recta es densa y ésta representa el espacio en nuestro movimiento, es posible pensar que ésta al igual que el espacio es contigua.

Es decir que todos los posibles segmentos de recta están uno tras del otro sin espacio entre ellos ya que cuando observamos el movimiento, no vemos que se encuentren saltos entre las distancias que van siendo recorridas. Esto plantea un nuevo punto de estudio de nuestro problema que en resumen es el siguiente, la posibilidad de que dos objetos o segmentos<sup>4</sup> que siempre estén juntos no sean uno solo, si tenemos dos segmentos de línea que siempre están juntos, es decir, que son contiguos ¿Qué garantiza que no sean en realidad un solo segmento? Para explicar este punto será útil el siguiente ejemplo.

---

<sup>4</sup> Entendiendo el segmento como un pequeño conjunto de números representados en la recta que se encuentra junto a otro pequeño conjunto de números del mismo tipo, se está hablando sobre la posibilidad de que estos dos conjuntos estén siempre uno al lado del otro y no sean por consiguiente uno solo.



Figura 1-2. Recta

Si pensamos en una cortadura  $I$  que divide la recta que va desde  $A$  hasta  $B$  en los segmentos de línea, desde  $A$  hasta  $I$  (lo que será llamado  $K$ ) y uno que va desde  $I$  hasta  $B$  (que será llamado  $K'$ ) la primera pregunta que puede surgir es ¿pertenece el número asignado a  $I$  al segmento  $K$  o al segmento  $K'$ ?, la respuesta no es tan complicada, pertenece a ambas y no pertenece a ninguna al mismo tiempo, es claro que la afirmación anterior puede ser confusa si no tenemos en cuenta la diferencia entre número y atributo, en otras palabras a la cortadura  $I$  le asignamos un número y un atributo.

El número asignado a  $I$  debe ser indudablemente el valor asignado al desplazamiento de nuestro objeto en nuestra unidad establecida desde  $A$  hasta esa cortadura, mientras que los atributos asignados al punto  $I$  serán marcar el final de un segmento y el comienzo de otro, para concluir este punto es posible afirmar que la cortadura  $I$  determina el final del segmento  $K$  y el principio del segmento  $K'$ , de este modo podemos decir que en su atributo pertenece a ambos.<sup>5</sup>

Es claro que en el ejemplo anterior ha sido evitado de muchas formas usar la palabra “punto” y remplazándola por la palabra cortadura que usa Dedekind de una forma impecable, todo esto para evitar la visión más común de la línea, en la cual está formada por puntos y desde la visión de Aristóteles desde la cual hemos venido definiendo el movimiento como un continuo por excelencia, el continuo no puede estar formado por partes indivisibles.

### 1.1.1 EL PROBLEMA DEL PUNTO

Dentro del problema del movimiento Aristóteles afirma que el continuo (refiriéndose al espacio y su representación la línea, no puede estar formada por elementos indivisibles, para comprender mejor sus argumentos, será analizada la primera parte del capítulo VI de su libro *Física*.

*“Si la continuidad, el contacto y la sucesión son tales como los hemos definido antes —es decir, si decimos que son «continuas» aquellas cosas cuyos extremos son uno, «en*

<sup>5</sup> Este es otro ejemplo de como una cortadura divide un sistema, en este caso la línea en dos partes.

*contacto» cuando sus extremos están juntos, y «en sucesión» cuando no hay ninguna cosa del mismo género entre ellas...” (Aristóteles, 1995)*

Aristóteles se opone a la idea del punto porque en su forma de entender el continuo, cumpliendo con su idea de contigüidad, es imposible pensar que algo que sea contiguo tenga extremos, el punto como unidad indivisible significa que debe tener un extremo y aunque dos puntos o una infinidad de puntos estén siempre unidos, para Aristóteles es imposible pensar que algo que no tiene extremos sea continuo, ya que desde su visión, la continuidad tiene que ser algo que no tiene extremos, límites ni partes.

Según Aristóteles cuando se dice que una cosa toca a otra, quiere decir que una parte de esa cosa está en contacto con una parte de la otra, y como se dice que el punto no tiene partes, en conclusión el punto debería tocar a su punto más próximo en su totalidad, lo cual es imposible de pensar sin concluir que ambos puntos o estarían superpuestos o serían en conclusión uno solo.

En lo anterior Aristóteles intenta mostrar por qué cosas como el tiempo y el espacio, y su representación en una línea no puede estar conformado por unidades indivisibles, pero va más allá, mostrando un ejemplo que, para él, muestra la necesidad de la divisibilidad del espacio y el tiempo dentro del movimiento.

Aristóteles prepara todo lo anterior para plantear un punto de vista en su discusión con Zenón de Elea en cuanto a la divisibilidad infinita del espacio y el tiempo, todo esto debido a la famosa paradoja de Aquiles y la tortuga.

*“La paradoja para ejemplificar las consecuencias de dividir infinitamente el espacio, el tiempo y la magnitud es la comúnmente llamada “Aquiles y la tortuga”, ésta plantea la imposibilidad que tendría un corredor muy hábil en alcanzar a otro, aunque fuera tremendamente lento, si el espacio, el tiempo y la magnitud pudieran dividirse infinitamente. Dice Zenón que si Aquiles se propusiera alcanzar una tortuga en un estadio, habiéndole dado una ventaja previa de medio estadio antes de comenzar él mismo a correr, no lograría nunca darle alcance, porque cada vez que llegara a la posición que ocupara la tortuga anteriormente, ésta ya habría avanzado aunque fuera una distancia infinitesimal y divisible siempre cada vez más.” (Machado, 2009)*

Esta paradoja clásica de la filosofía griega tiene un profundo análisis desde el problema de la continuidad, pues si se dividiera el espacio entre Aquiles y la tortuga al infinito, el resultado sería que Aquiles nunca alcanzaría a la tortuga, y esto va totalmente en contra

de la experiencia, parece que la idea del espacio continuo, infinitamente divisible y sin saltos.

Cuando es tratado en el movimiento, tiene un problema en el razonamiento. Aunque a esta paradoja se le han planteado un sin número de soluciones, seguiremos remitiéndonos a Aristóteles, quien plantea su propia solución y considera que la contradicción es el resultado de una mala aplicación de la idea de la divisibilidad al infinito, la cual puede ser resumida en la siguiente cita:

*“Es, pues, imposible que una magnitud infinita sea recorrida en un tiempo finito, o una magnitud finita en un tiempo infinito. Si el tiempo es infinito, también la magnitud será infinita, y si lo es la magnitud también lo será el tiempo.” (Aristóteles, 1995)*

Es decir, que si consideramos que Aquiles está recorriendo cantidades infinitamente pequeñas, debemos considerar que también las está recorriendo en tiempos infinitamente pequeños.

En conclusión tenemos descripciones del espacio y del movimiento que pueden ser pensados como continuos y que permiten ser representadas a partir de la línea. Pero sobre el significado de poder extender el espacio infinitamente o pensar en divisiones infinitamente pequeñas, serán confusas si no se piensa en el significado mismo de pensar en el infinito.

He aquí otro de los puntos que serán analizados, la idea del infinito es una idea que ha sido enseñada de tal forma que parece que todos entendemos el significado de la palabra infinito y de sus representaciones en la matemática y en la física.

## **1.2 SOBRE EL PROBLEMA DEL INFINITO**

La línea continua que fue construida representa el espacio recorrido por el cuerpo, ésta es divisible hasta el infinito. Entonces, retomando los puntos anteriores, existe una relación entre el infinito y el espacio representado por la línea. El espacio, al igual que la línea debe ser divisible hasta el infinito, y como se dijo anteriormente se percibe dentro del fenómeno como continuo por excelencia, en donde es necesario señalar que desde la experiencia cotidiana, es difícil pensar en un comportamiento de la naturaleza donde el espacio no sea percibido como continuo en primera instancia.

Esta experiencia adquirida en la naturaleza es desde la interpretación de Salanskis como se construye en Kant el continuo *“Lo que es claro en efecto es que el continuo se dice de la intuición pura del espacio, es decir, de aquello que es en él forma de la presentación (externa)”* (Alvarez & BARAHONA, 2002). Es aquí donde se debe tener más cuidado, pues así como se vio en el ejemplo de la paradoja de Zenón y como Aristóteles intento corregir, el continuo de la intuición pura no es el único continuo sobre el cual podemos reflexionar, se deberá entonces separar el continuo en dos clases: la primera de ellas, el continuo tratado por Kant, es decir el que ha sido tratado hasta ahora, el que será llamado “real”<sup>6</sup> y el continuo que proviene solo de nuestras ideas, aquel será llamado, el continuo infinito. Como ejemplo tenemos, extender una recta hasta el infinito, imaginar un plano infinito, una división infinitamente pequeña, etc.

Como se dijo anteriormente, el continuo que llamamos infinito deberá entonces ser limitado al plano de las ideas, ya que proviene exclusivamente de la imaginación del ser humano. La imaginación del ser humano muchas veces esta confundida con la capacidad de recordar o asignar un objeto a nuestro recuerdo. Cuando a una persona se le dice “imagínese una silla” la imaginación se refiere a la capacidad de asignar un objeto reconocido anteriormente a el vocablo o signo “silla”. La imaginación a la que se refiere el continuo infinito es distinta, ya que no permite asignar un objeto a su signo o representación, imaginemos un objeto común, una mesa, un cuaderno, un lápiz. Ahora bien, imaginemos un objeto más grande, un edificio y por ultimo imaginemos que este edificio se hace infinitamente alto, ¿no es extraño que en este último punto a nuestra imaginación le sea imposible asignar el objeto con claridad? Es claro para nosotros que desde este punto de vista el continuo infinito será al cual no se le puede asignar ningún objeto.

Si no podemos asignar ningún objeto, entonces quiere decir que está agotado en su representación, porque no podemos representar con ninguna forma física u objeto conceptos como por ejemplo, el espacio infinito, es esta la ventaja de las representaciones matemáticas sobre las físicas, Aristóteles lo plantea de la siguiente forma *“sobre todo el número y la magnitud matemática parecen infinitos por que las representaciones no los agotan (...) el problema que el físico debe examinar es si existe*

---

<sup>6</sup> Es llamado continuo real porque desde la discusión consideramos real todo lo que proviene de nuestros sentidos, sin entrar en la discusión sobre la confiabilidad de los sentidos y la realidad (por ejemplo la alegoría a la caverna de Platón y Descartes)

*una magnitud sensible infinita*” (Alvarez & BARAHONA, Introducción, 2002) aunque no es posible asignar a la línea infinita o al conjunto de los números reales un objeto real que contenga toda su extensión, es posible hacer una representación con los símbolos matemáticos que no limiten la representación, las magnitudes físicas, que provienen de la experiencia no poseen esta ventaja y se encuentran limitadas. Es desde esta perspectiva como se diferencia el espacio como un continuo finito y que no pertenece a las representaciones inagotables. Y así el espacio infinito se vuelve posible solo en potencia, en palabras de Leibniz *“Queda entonces que el infinito exista en la imaginación, solo sin que la imaginación conozca el infinito. Pues cuando la imaginación conoce, simultáneamente asigna le asigna al objeto de su conocimiento una forma y un límite...”* (Alvarez & BARAHONA, Introducción, 2002) .

El espacio no es la única magnitud física que se nos presenta continua desde la intuición, por otro lado se encuentra la materia: la idea sobre la constitución de las cosas que encontramos en la naturaleza, es otra de las ideas que parecen llegar a nuestra mente como perfectamente continuas, un ejemplo son las siguientes palabras de Leibniz : *“... porque cada porción de la materia no es solamente divisible hasta el infinito, como reconocieron los antiguos, sino que incluso cada una de las partes esta subdividida actualmente y sin fin en partes...”* (Leibniz, 1894).

En mi opinión esta es una afirmación bastante temeraria por parte de Leibniz ya que la imposibilidad de pensar en el discreto no puede sugerir necesariamente el continuo, es decir poder dividir un objeto por la mitad varias veces, no sugiere necesariamente que será divisible infinitamente así como tampoco sugiere que lleguemos a la “unidad” del objeto. Si tenemos una hoja de papel y la dividimos por la mitad y de nuevo por la mitad y así sucesivamente, no se puede garantizar que la hoja sea divisible hasta el infinito, Poincaré llamaría un ejemplo como este *“una clasificación aparentemente predictiva”* (Poincare, 1913) aunque la posibilidad de dividir la hoja hasta el infinito parece imposible por los límites de nuestras herramientas y sentidos, así esas condiciones se cumplieran, no tenemos una garantía real de esa posibilidad, para hacer clara esta idea debo recurrir a un pequeño ejemplo matemático.

Se define un conjunto de números naturales que cumplen la siguiente condición  
donde  $n$  e  $i$  pueden tomar cualquier valor en los números naturales excepto cero, ¿será posible entonces que en el conjunto un

elemento X siempre obtenga el valor de un número par?, desde luego, pues esta representación no agota la magnitud matemática ni la extensión del conjunto (valor número par), esto significa que todo elemento de X (número n) introducido en la representación cumplirá con que X será un número par, esto quiere decir que hemos encontrado una clasificación realmente predictiva.

Ahora se sabe que en nuestro ejemplo la divisibilidad al infinito de la hoja de papel es una condición que pensamos inmutable, es decir es una clasificación que pensamos que no va a cambiar, pero como no tenemos garantía real, es una predicción aparentemente predictiva, en la cual no podemos confiar ciegamente la explicación de los fenómenos y la descripción de los objetos.

Pareciera entonces que el continuo y más aún el número como representación del continuo no son las formas últimas de explicación y representación de la naturaleza, pues aunque el número y la matemática con la que se trabaja permiten representaciones que no agotan los objetos, no puede tener el mismo tratamiento en la representación de los fenómenos y de las cantidades físicas; en otras palabras, tenemos que “contextualizar” el número. Desde la visión de Stevin el número no es sólo una cantidad “numerable” como lo pensaba Aristóteles de alguna forma, él además introduce que el número debe ser una cantidad medible. Y propone 3 premisas

- a) *La unidad (numérica o geométrica, ahora identificadas) es un número.*
- b) *La unidad es divisible ilimitadamente.*
- c) *Las partes de la unidad son a su vez números (Alvarez & BARAHONA, La continuidad en las ciencias, 2002)*

Aunque a simple vista estas premisas no parecen nada especial, Stevin niega la discretez<sup>7</sup> de la unidad numérica y de sus posibles partes, es decir el número ahora es continuo sin ninguna contradicción, pero va aún más allá, confirmando la continuidad aristotélica del número pero como cantidad aislada, es decir como ente matemático separado de las descripciones del mundo y de los fenómenos. Pero cuando es usado en la cuantificación de un objeto o medida, éste conserva la cualidad del objeto que está cualificando<sup>8</sup>, como ejemplo tenemos que el número 1 por sí solo es continuo y divisible, cuando se usa en la medida de 1 metro, continúa siendo continuo y divisible,

---

<sup>7</sup> Utilizo esta palabra, porque es la usada en el texto de Alvarez y Barahona para ejemplificar este punto

<sup>8</sup> Adquiere las cualidades del objeto al cual se refiere el número.

pero cuando cualifica un objeto como por ejemplo un hombre, se convierte en una cantidad discreta.

Como vemos el número no es por si solo un ente continuo por excelencia, sino que depende de las *“propiedades circunstanciales de los objetos que son cualificados”* (Alvarez & BARAHONA, La continuidad en las ciencias, 2002). Esto sugiere que deberemos ser cuidadosos en elegir las descripciones adecuadas para los fenómenos y además nos muestra que una sola visión continua o discreta no puede ser generalizada para la explicación de la totalidad de los acontecimientos en la naturaleza.

### **1.3 SOBRE LA DIVISIBILIDAD DE LA MATERIA**

Ya han sido tocados varios aspectos sobre la visión continua de la divisibilidad de la materia, mostrando que esta visión aparentemente predictiva no muestra ventajas contundentes para el conocimiento, ya que la experiencia no puede garantizar la validez de las explicaciones, así mismo el uso del número también debe estar contextualizado.

Por eso es permisible pensar en la validez de otras formas explicativas cuando la experiencia no aporta, es decir podemos pensar en la forma discreta de la divisibilidad de la materia, no obstante esta visión tampoco tiene ventajas explicativas, como lo ejemplifica galileo *“Vemos que los frutos, las flores y otros muchos objetos sólidos transforma en aroma gran parte de la sustancia, pero no vemos, por su parte, que átomos olorosos se reúnen para formar los sólidos correspondientes. Allí, sin embargo, donde la experiencia se revela impotente debemos recurrir a la razón.”* (Galilei, 1995). Cuando la experiencia es insuficiente se debe recurrir a la razón para la explicación de los fenómenos, pero sin confiar ciegamente en ella, buscando que la razón nos dé una salida o una manera de idear una experiencia que confirme nuestras ideas.

Desde la antigua Grecia con Demócrito ha existido la idea de que toda la materia está compuesta por diferentes combinaciones de los mismos elementos indivisibles “simples” de la naturaleza y esta idea de una unidad indivisible es lo que generalmente se ha llamado la discretización de la materia, esta idea sobre la materia es bastante antigua, pero formalizada hasta hace "muy poco tiempo". Esta primera idea de formalización de la materia como algo discreto no fue producto de la búsqueda del “átomo” de Demócrito, como se piensa generalmente.

La primera discretización formalizada de la materia fue una relación encontrada por Dalton entre los pesos de los diferentes elementos, estas relaciones eran fijas y necesarias para que los elementos se combinaran unos con otros -"la combinación sólo tiene lugar cuando se cumplen proporciones de PESO definidas entre las sustancias a combinar". Para ilustrar tomemos el caso del agua donde para obtener esta sustancia por cada 8 partes en peso de Oxígeno se necesita 1 parte de Hidrógeno- (REYES). Este es un ejemplo de un salto común en la enseñanza de la teoría discreta de la materia (teoría atómica), pues se enseña que el átomo (debido a su antigüedad como idea) ha existido en las ciencias desde hace mucho tiempo, cuando en realidad la primera formalización de la idea del átomo fue el resultado de las relaciones y combinaciones enteras y no enteras entre los pesos atómicos de los elementos.

Este trabajo no propone la mirada discreta de los fenómenos como la correcta, pretende mostrar la importancia de la experiencia en ambas miradas para comprender los conceptos. Hemos dicho anteriormente que desde la razón ambas miradas pueden ser igual de validas, así que la experiencia deberá mostrar cuál de las dos formas explicativas es la más apropiada o la que describe y explica el fenómeno de una forma más completa, es importante conocer ambas miradas "*parecería entonces que la oposición continuo- discreto es la primera fuente de inteligibilidad para aproximarse a la comprensión del continuo*" (Alvarez & BARAHONA, Introducción, 2002), de un modo parecido se puede ver en Euclides, las ideas de "lo uno y lo mucho", "lo ilimitado y lo limitado" estas descripciones no tienen sentido si no está complementadas una con la otra.

La oposición entre continuo-discreto no es por si sola una herramienta para la comprensión de conceptos, debe estar acompañada de la experiencia, es para nosotros claro que así como se comporta esta oposición de continuo y discreto, se comporta la física misma, expresada por las siguientes palabras:

*"La muerte de las teorías e hipótesis científicas nos revela muchas cosas acerca de la naturaleza de la ciencia. Examinando la historia de las teorías muertas se ve que la adquisición de conocimiento científico es un constante refinar de nuestros instrumentos de observación y de los conceptos con que organizamos los resultados de las observaciones. La ciencia es un edificio en perpetua construcción, es cierto, pero además se construye sobre cimientos cambiantes."* Régules, (2003) citado por (González, 2006)

De lo anterior podemos encontrar muchos ejemplos, en la mecánica cuántica como uno de ellos, se hace necesario el marco corpuscular, el de los fotones para explicar los experimentos sobre la naturaleza de la luz, pero esto no significa que es la mirada correcta que hay que tener hacia la naturaleza, pues no permite explicar fenómenos como la interferencia, estaríamos entrando entonces en una nueva clasificación aparentemente predictiva, lo cual no debe ser permitido en la explicación de los fenómenos. Entonces deberemos recurrir a la mirada de la teoría de campos para entender interferencia.

Continuando con la mecánica cuántica otro ejemplo para mostrar la necesidad de contextualizar la mirada (así como se hablaba de contextualizar el número) es la difracción de electrones muestra la dificultad al pensar el electrón en una unidad “indivisible” ya que si se difracta no puede cumplir con la afirmación anterior, que era la idea que se tenía sobre el electrón antes de esta prueba experimental.

Esta es solo una muestra de cómo ha cambiado el concepto de lo atómico desde el descubrimiento del quantum de acción de Planck *“se muestra un nuevo carácter de atomicidad en la materia. Uno que no solo se limita a la divisibilidad limitada de la materia”* (Bohr, 1949).

El problema en el que se va a centrar la siguiente parte del estudio, es la contraposición entre dos formas explicativas respecto a la termodinámica, específicamente a la termodinámica molecular, serán estudiadas dos corrientes del pensamiento, una de ellas la energetista que consideraba que la energía era el concepto más importante dentro de las ciencias y que la unificación de las teorías y la explicación de la naturaleza, podría ser lograda a través del estudio de este concepto. Desde este punto de vista, la energía era considerada como un flujo y como todo flujo, era considerado continuo, como el calor era reconocido como una forma de la energía, del mismo modo el calor debería ser un flujo de energía continuo.

Desde la otra perspectiva tenemos la perspectiva mecánica de la termodinámica, en la cual el calor era producido por la fricción entre unidades simples de la materia que se mantenían en movimiento constante (los átomos). Por ejemplo en los fluidos. Esta es la gran contradicción que estudiaremos sobre la continuidad de la energía y la naturaleza del calor.

## **CAPÍTULO 2.**

### **ATOMISMO VS ENERGETISMO**

En el capítulo anterior fueron analizados algunos puntos sobre las visiones de lo continuo y lo discreto, cómo las visiones en la mayoría de los casos son contrarias y no complementarias, y cómo desde las representaciones matemáticas, el problema parece inexistente (hablando específicamente sobre las representaciones de los objetos).

En cuanto a la Física se mencionó cómo las representaciones de los objetos en la física se hacen más complicadas cuando no es posible reconocer el objeto, es por esto que varias representaciones pueden tener la misma validez en algún momento y que pueden confrontarse mostrando los mismos resultados, no obstante lo que definirá que visión ayuda a describir los fenómenos será su capacidad explicativa.

En este capítulo se mostrará la forma en la que las visiones de continuo y discreto se enfrentan en la física para mostrar un ejemplo tangible de la necesidad de reflexión sobre este problema a la hora de enseñar un fenómeno físico, y más importante aún, cuando se pasa de una visión a otra. Haciendo énfasis en la necesidad argumentada del cambio de visión, pues en muchas ocasiones cambiamos de una a la otra rápidamente y no reflexionamos sobre el sentido del cambio de visión o del uso privilegiado de una de las visiones, muchas veces en término de su utilidad explicativa o de su valor heurístico<sup>9</sup> para la enseñanza de los fenómenos físicos.

La corriente energetista era una fuerte corriente de trabajo científico que consideraba la energía, como el concepto más importante para la física y para la ciencia en general. Desde su punto de vista, todos los fenómenos de la naturaleza (incluidos los psicológicos) podían ser explicados en términos de las transformaciones de los diferentes tipos de energía y como estas transformaciones eran visibles en la cotidianidad, obtenían además un valor experimental con el que no contaba la teoría que se “contraponía” a esta, es decir el mecanicismo.

---

<sup>9</sup> Técnica de la indagación y del descubrimiento. Real Academia Española. (2001). Diccionario de la lengua española (22.a ed.). Consultado en <http://www.rae.es/rae.html>

El mecanicismo era una corriente que planteaba que muchos de los fenómenos de la naturaleza podrían ser explicados en analogías o más aun cumpliendo los mismos principios de los fenómenos mecánicos reconocidos hasta el momento, el calor como resultado de la fricción entre átomos era una idea que planteaba una interpretación distinta de la termodinámica de la época, aunque era una idea que permitía explicar fenómenos, “no existían” pruebas experimentales para ella.

## **2.1 OSTWALD VS BOTLZMANN, UNA CONTROVERSIAS SOBRE LA NATURALEZA DE LOS FENOMENOS.**

Ya había sido mencionado que para Wilhelm Ostwald, la energía era el concepto más importante y unificador en las ciencias, pues sobre este concepto dice *“Ninguno permite expresar tantas cosas relativas al contenido de este mundo, ni expresarlas con tanta precisión y unirlos tan perfectamente entre sí. Este concepto es la energía”* (Ostwald, 1911). La energía es para él, el concepto ontológico más importante dentro de las ciencias, el unificador por excelencia y que permite explicar la mayoría de fenómenos.

No obstante Boltzmann considera que al contrario de la pretensión energetista, esta forma de ver la naturaleza presenta graves problemas en su capacidad explicativa, hablando de problemas específicos de la termodinámica y sobre todo en la transformación de la energía mecánica en calor, en procesos de evaporación y otros, Boltzmann dice que ni siquiera la teoría cinético-molecular de la materia presenta imágenes creíbles sobre estos fenómenos, y dice *“la energética parece estar todavía muy lejos de poder solucionar todos los problemas que hemos esbozado aquí. Hasta que lo haya logrado no se puede emitir un juicio sobre las hipótesis auxiliares que la energética necesita para una tarea semejante...”*. (Boltzmann, Sobre la energética, 1986).

Oswald cree respecto a este punto que el problema va más allá de la ciencia, es decir, para él, el atomismo había sido ascendido casi a una deidad científica en la cual todos los fenómenos de la naturaleza podían ser explicados:

*“... el materialismo científico se considera como una doctrina, por decir así, intocable. Se pensaba que los fenómenos de la naturaleza encontraban su explicación en las leyes mecánicas, a las cuales estaban sometidas los átomos, y no era una hipótesis cuya exactitud*

*necesitaba ser demostrada, sino un postulado que debía ser la base de las investigaciones científicas”*. (Ostwald, 1911)

Según Ostwald el concepto átomo era la solución “mágica” a todos los fenómenos de la naturaleza, Boltzmann en este sentido es claro y señala que el concepto átomo en si no puede ser considerado como la entidad última de la materia, ya que el átomo no debe ser considerado como un concepto, sino como un ente real que posee ciertas propiedades<sup>10</sup>, y en caracterizar, diferenciar y entender estas propiedades es posible encontrar las explicaciones a los diferentes fenómenos de la naturaleza:

*“... para que puedan representar muchos dominios simultáneamente, por decirlo así, el atomismo descompone en componentes las propiedades de los átomos que son necesarias para explicar los dominios individuales, de tal modo que aquellas sirvan simultáneamente para varios dominios de hechos. Obviamente. Esto no es posible sin una cierta arbitrariedad que va más allá de los hechos, del mismo modo como se hace en la descomposición de una fuerza en sus componentes.”* (Boltzmann, Sobre la inevitabilidad del atomismo en las ciencias de la naturaleza, 1986) .

Este punto, sobre la “arbitrariedad” que va más allá de los hechos fue el punto de mayor ataque por parte de los energetistas, especialmente por parte de Ostwald, quien pone los problemas que él considera del atomismo sobre la mesa de discusión de la siguiente forma:

*“la hipótesis mecanicista tiene dos inconvenientes muy considerables; en primer lugar, obliga a adoptar en gran número otras hipótesis indemostrables, y después, es impotente para hacer comprender la unión que indiscutiblemente existe, como lo comprobamos a diario, entre los fenómenos físicos en el sentido estricto de la palabra y los fenómenos psicológicos<sup>11</sup>”*. (Ostwald, 1911).

Además de este punto sobre la falta de “experimentación” que pueda comprobar las ideas de la hipótesis mecanicista (atomista), Ostwald recurre a trabajos anteriores, por ejemplo alrededor del trabajo de transformaciones de energía, le era posible afirmar que los fenómenos mecánicos no eran otra cosa que un caso muy particular de las transformaciones de energía y en el caso de los fenómenos celestes “... *las energías mecánicas son tan grandes y las posibilidades de transformación de energía mecánica*

---

<sup>10</sup> Considero que a lo que Boltzmann se refiere es que dependiendo del área de estudio de la física, se hacen más importantes unas propiedades del átomo que otras, por ejemplo: en la mecánica, la masa. En el electromagnetismo, la carga. Y en la termodinámica, el movimiento de los átomos.

<sup>11</sup> Sobre los fenómenos psicológicos y la energética sociológica tratan los últimos dos capítulos del libro de Ostwald, es claro como para él la energía podía ser el concepto unificador no solo de la física, sino de todas las ramas del conocimiento.

en otra especie son tan mínimas, que prácticamente pueden concebirse y representarse estos fenómenos como puramente mecánicos.” (Ostwald, 1911). Mientras que desde su forma de entender el mecanicismo, solo explicaba una gran cantidad de fenómenos aislados ente ellos.

Hasta el momento han sido señalados algunos puntos dentro de esta discusión, en el sentido riguroso del estudio, la única contradicción entre ambas posturas es que los atomistas parecían no tener ninguna base fenomenológica para sus afirmaciones, aunque respecto a este punto podría pensarse “nadie conoce realmente la energía”, por lo tanto es un concepto de la misma naturaleza que el átomo, los energetistas sabían bien que debían tener una base fenomenológica, la cual no estaba basada en el concepto puro de energía, pues este concepto, a mi modo de ver, era exactamente igual de ininteligible que el concepto que atacaban, no obstante, se apoyaban en la idea de que cada estado de un cuerpo estaba caracterizado por un valor completamente determinado de su energía, es decir un cuerpo era un agregado complejo de los diferentes tipos de transformación de la energía. Por ejemplo los que consideraba Mayer y que pongo en mi propia versión sobre las formas de energía<sup>12</sup>.

Imponderables					
I	II		III	IV	V
Fuerza de caída	Movimiento		Calor	Magnetismo • Electricidad • Corriente galvánica.	• Separación química de ciertas materias. • Reunión química de otras materias.
Fuerza Mecánica	Efecto Mecánico			Fuerzas Químicas	
	Simple	Ondulatorio, vibratorio			

Tabla 2-1. Cuadro de Robert Mayer sobre las diferentes energías (Ostwald, 1911), Pág. 157.

Del cuadro anterior es posible ver como Mayer y los energetistas reconocen que a pesar de su consideración de objeto como una suma de transformación de energías, algunas de

<sup>12</sup> Es pertinente mencionar que para Ostwald, Lo que Mayer llama en su cuadro fuerza, es lo que actualmente llamamos energía.

éstas eran para ellos imposibles de medir en sí mismas, pueden determinarse las diferencias que presenta este valor cuando un cuerpo pasa de un estado a otro, por ejemplo no es posible medir el calor, sino a partir de su “fluir” cuando existe una diferencia de temperatura.

Sobre el calor era el punto en el cual estas dos visiones de la naturaleza chocaban irreconciliablemente, pues el calor era una forma de la energía que podía ser transformada en otras, si el calor era un efecto de los movimientos atómicos, como lo asumía Boltzman, el calor dejaría de ser el concepto último de las ciencias, ya que sería dependiente del movimiento. Esto era inaceptable para los energetistas, más aun teniendo en cuenta que no había ningún fundamento fenomenológico que permitiera siquiera pensar la validez de esta idea del “movimiento atómico”.

Al respecto, Ostwald menciona esta idea con las siguientes palabras

*“La teoría de las vibraciones térmicas tiende a admitir que el calor es efecto del movimiento, sin embargo, no reconoce claramente ni en todo su alcance esta relación causal, y llama principalmente la atención sobre vibraciones de difícil interpretación”* (Ostwald, 1911).

No solo la teoría de vibraciones térmicas era imposible de probar experimentalmente, sino que además desde su forma de ver, no hacía explícitas las relaciones entre calor y movimiento, lo cual era una falencia para comprender la naturaleza, es decir generar causas separadas de los efectos.

Respecto a este punto Boltzmann responde indirectamente, *“no podemos eludir la consecuencia de que las partículas más pequeñas se encuentran en un movimiento relativo invisible para la vista que absorbe la energía cinética visible y cuya perceptibilidad no es improbable...”* Y más adelante:

*“desearía decir que si las consecuencias globales de la mecánica especial del calor, que pertenecen a los dominios más dispares de la naturaleza, fueran confirmados por la experiencia, coincidirían maravillosamente hasta en los más finos detalles con el pulso de la naturaleza.”* (Boltzmann, Sobre la inevitabilidad del atomismo en las ciencias de la naturaleza, 1986).

Boltzmann confiaba en que sus ideas podían ser comprobadas experimentalmente, infortunadamente debido a su aislamiento académico, ya que la teoría atómica era

aceptada solo por una pequeña parte de científicos alemanes, mientras que sus seguidores más eminentes eran hasta ahora estudiantes en los institutos alemanes como por ejemplo Einstein y Sommerfeld. Boltzmann no busco el sustento experimental a sus teorías, se conformó con dar y pensar ideas en las cuales confiaba que la teoría especial del calor que había alimentado con tanto trabajo, podría ser comprobada experimentalmente:

*“pero aunque las observaciones actualmente disponibles en las que parece observarse un movimiento molecular en los líquidos y gases no son concluyentes, no puede negarse la posibilidad de que lo sean las observaciones futuras”* (Boltzmann, Sobre la inevitabilidad del atomismo en las ciencias de la naturaleza, 1986).

Se sabe que Boltzmann a causa de su depresión y soledad, se suicidó sin buscar ni conocer la experiencia que comprobara sus aportes a la teoría especial del calor, mientras tanto, dos sucesos importantes tenían lugar, el primero de ellos Albert Einstein se instruía en sus ideas gracias a su libro *“gastheorie”* y el segundo, pero no menos importante, se continuaban desarrollando los análisis alrededor de un fenómeno bastante antiguo, el movimiento browniano.

Einstein siempre admiró a Boltzmann por su trabajo alrededor de la teoría cinético-molecular del calor y confiaba en sus afirmaciones, no obstante, siempre critico la falta de sustento experimental en sus ideas, los dos sucesos anteriormente mencionados serian cruciales para determinar el final de la discusión energetistas – atomistas, alrededor del concepto de calor, pues terminaría siendo Einstein quien comprobaría que el movimiento browniano podría ser una forma de los movimientos moleculares sugeridos por la teoría especial del calor.

El argumento más fuerte de los energetista, seria derribado por el movimiento browniano. El cual terminaría siendo una muestra de la “realidad” de los átomos, pues combinadas con las experiencias con espectros atómicos y los modelos que estos sugerían para la constitución de la materia, además de la publicación del libro *“les atomes”* de Jean Perrin. Terminarían por que generar que el profesor de la universidad de Leipzig Wilhelm Ostwald, en 1909 escribiera una declaración aceptando la realidad física de los átomos (Golzález, 2006).

## **CAPÍTULO 3. EL MOVIMIENTO BROWNIANO**

Según las apreciaciones de Boltzmann, debería existir un movimiento aleatorio en los fluidos y gases, el cual debería ser más o menos intenso dependiendo de la temperatura del fluido o del gas, Y debido a que las agitaciones moleculares que suponía, se vería los cambios de calor en el sistema.

Boltzmann en sus escritos nunca menciona el movimiento browniano, por su parte Einstein quien confiaba en la veracidad de las afirmaciones de Boltzmann, pensó que este movimiento podría coincidir con el descrito por el botánico escocés por Robert Brown en 1827, cuya explicación que hasta entonces era un misterio pese a grandes intentos realizados por diferentes autores que serán revisados en este capítulo, y que sería una comprobación experimental de las ideas de la termodinámica molecular planteada por Boltzmann.

En este capítulo, se realizara un estudio sobre las ideas, preguntas y problemas que planteaba el movimiento browniano a los diferentes científicos que lo estudiaron alrededor de los años, comenzando con el mismo Robert Brown (a quien debe su nombre el fenómeno) hasta Einstein quien el 1905 publica un artículo realizando una explicación sobre algunas de las variables (ya reconocidas anteriormente) y su relación con el desplazamiento medio cuadrado de una partícula pequeña suspendida en agua, infortunadamente hasta 1905 y un par de años posteriores, los métodos experimentales mostraban medidas poco confiables para considerar una comprobación experimental de esta explicación, hasta que en 1909 Jean Perrin logra desarrollar un procedimiento sistemático para comprobar la teoría de Einstein.

No obstante, a pesar de la rigurosidad de Perrin en sus medidas y del ingenio de Einstein en su explicación, ambos diferían en sus resultados en una cantidad no aceptable para las ciencias y se tardarían bastante tiempo en encontrar los errores cometidos por cada uno.

Después de estas correcciones, se pudo decir que había sido encontrada una explicación desde las leyes de difusión, para el movimiento browniano. Es necesario mencionar que Einstein no fue el único científico en explicar satisfactoriamente el movimiento Browniano, en 1906 Marian Smoluchowski crea una explicación del movimiento más

refinada y que daría paso a la ciencia de los procesos estocásticos, mientras que la de Einstein daría paso a la rama de fluctuaciones en la física.

### 3.1 LA PRIMERA DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO BROWNIANO

Es muy complicado y hasta podría ser ilógico pensar que Robert Brown fue el primer científico en observar el movimiento browniano, pues cualquier persona que hubiera visto alguna partícula diminuta de cualquier material suspendida en agua en un microscopio, hubiera observado este movimiento.

Pero el crédito de Brown no es el de descubridor del movimiento que lleva su nombre. En un sentido estricto aunque no fue el primero que lo descubrió, si fue el primero que decidió hacer observaciones sistemáticas de este fenómeno y hacerlas públicas para que fuera estudiado por el clima científico de su época.

En 1827 Aparece por primera vez la publicación de las observaciones de Robert Brown *A BRIEF ACCOUNT OF MICROSCOPICAL OBSERVATIONS made in the months of June, July and August, 1827 ON THE PARTICULES CONTAINED IN THE POLEN OF PLANTS AND ON THE GENERAL EXISTENSE OF ACTIVE MOLECULES IN ORGANIC AND INORGANIC BODIES* (Brown, 1827).

Brown mientras realizaba sus observaciones sobre la forma y los órganos sexuales de las plantas de la familia "*Clarckia Puchella*", usando un microscopio "común" desde las palabras de Brown, para la cuales el tamaño promedio de las partículas observadas eran de alrededor de 6.3  $\mu\text{m}$  y 5  $\mu\text{m}$ , describiendo las formas de las partículas observadas. Formas encontró en el polen formas regulares, esas formas variaban entre formas cilíndricas y oblongas.

Sus observaciones cambiaron de rumbo cuando encontró que las partículas de polen que estaba observando se movían, pero además de eso, se movían sin ninguna regularidad " *...While examining the form of these particles immersed in water, I observed many of them evidently in motion; their motion consisting not only of a change of the place in the fluid manifested by alterations in their relative positions...*" (Brown, 1827), esta descripción del movimiento es bastante primaria, pues sus esfuerzos estuvieron enfocados en construir una explicación "rápida" del movimiento. En este punto

específico de sus observaciones, Brown dice que el movimiento debería deberse a corrientes en el fluido o a la evaporación del mismo.

Brown era un gran botánico y un científico de una rigurosidad admirable, gracias a esto, se percató que los movimientos de las partículas de polen que observaba se movían de una forma totalmente independientes unas de las otras, de este modo parecía ser que el movimiento pertenecía a las partículas y no al fluido, como lo pensó en primera instancia.

Brown extendió sus observaciones a otras plantas de la misma familia<sup>13</sup> de la *Clarckia Puchella*, esta familia, según aparece en su texto es la llamada *Onagraria*, encontrando movimientos similares a los de la primera observación, continuando con este procedimiento, realizó descripciones sobre los movimientos encontrados para el polen de diferentes plantas<sup>14</sup>, encontrando en todas el movimiento que ya había descrito anteriormente. Brown señala lo siguiente: “... Pero especialmente para la *Gramineae*, la membrana del grano de polen es tan transparente que el movimiento de las partículas grandes dentro del grano entero fue claramente visible...”<sup>15</sup>, después de todas estas descripciones, Brown decide realizar su explicación más temeraria pues en sus palabras sin traducción “*Kinds of particles when immersed in water are generally seen in vivid motion*” (Brown, 1827).

Brown habla sobre la existencia de partículas que parecen tener un movimiento vivo cuando se encuentran en suspensión (específicamente en agua, esta es su primera conclusión a partir sus anotaciones del comportamiento de las plantas). Después de haber encontrado este movimiento en todas las partículas de polen que examinó de las plantas vivas, Brown desea ir aún más profundo en el análisis del problema, pues se pregunta sobre cuál sería el resultado de sus observaciones si repitiera la experiencia con especímenes muertos de las plantas que ya había usado.

Encontró con aun más extrañeza que en ambos casos, las partículas de polen (quemado) presentaban el mismo movimiento que ya había observado con las plantas vivas (polen

---

<sup>13</sup> Desde mi punto de vista no es raro que Brown decidiera extender las observaciones a la familia de plantas a la cual pertenecía el polen de la primera y no cambiar inmediatamente a cuerpos inertes, pues es plausible que pensara que solo el polen de esta familia de plantas presentaría ese comportamiento.

<sup>14</sup> Todas las descripciones pueden ser fácilmente encontradas en el artículo original de Brown, aquí solo serán mencionados los ejemplos que se crea, aportan más para el tema de estudio.

<sup>15</sup> *But especially to Graminae, the membrane of the grain of pollen is so transparent that the motion of the larger particles within the entire grain was distinctly visible*” (Brown, 1827)

extraído) y después de esta descripción, encuentra dentro de sus observaciones que las partículas pequeñas presentan un movimiento “más evidente” en palabras de Brown, y que las partículas más grandes tienen movimiento que se manifiestan mucho menos, y en algunos casos no son observables.

No satisfecho con haber encontrado todo lo anterior, Brown decide realizar sus observaciones con otros materiales, en general materiales inertes. como por ejemplo un “trozo de vidrio de ventana” que al ser molido cuidadosamente, puede permitir obtener partículas de la misma forma y de un tamaño comparable al del polen.

La decisión de Brown de pasar de materiales vivos a materiales muertos puede desde este análisis tener una motivación fundamental. La búsqueda de estas “moléculas activas” en otros materiales, y por lo tanto explicar los comportamientos encontrados en el polen y su relación con los encontrados en otros materiales, desafortunadamente lo anterior es solo algo que se infiere en este trabajo, pues Brown no hace explícita esta intención dentro de su escrito.

Brown no se detiene con haber encontrado el movimiento debido a sus “moléculas activas” en cuerpos inertes, en esta ocasión se pregunta por la naturaleza de aquellas moléculas activas que de hecho también existen en los materiales no vivos, en una ingeniosa prueba, Brown realiza las pruebas con los materiales, antes y después de ponerlos al fuego, obteniendo la siguiente conclusión sobre sus experiencias “*The general existence of the active molecules in inorganic as well as organic bodies, their apparent indestructibility by heat*”. (Brown, 1827)

Aunque Brown realiza una cantidad impresionante de experiencias y de ajustes al fenómeno, es un poco tímido en las explicaciones planteadas, tal vez por su formación en biología y prediciendo que esta experiencia debería ser trasladada a la física, realiza algunas explicaciones finales, considerando que el movimiento de las partículas es el resultado de la combinación de diferentes factores, entre ellos menciona las atracciones y repulsiones entre las partículas mismas, su equilibrio inestable, posibles corrientes en el fluido y diminutas burbujas de aire dentro del mismo.

### 3.2 TRABAJOS Y APORTES ANTERIORES A EINSTEIN

Después de la rigurosa descripción realizada por Brown, el movimiento duró varias décadas alejado de los estudios de los científicos. El hombre a quien se acreditan las primeras observaciones nuevas es Norbert Wiener, quien en 1863 concluyó desde las observaciones realizadas que el movimiento no podía ser el resultado de corrientes de convección en el fluido y comprendiendo algunos de los desarrollos de la teoría cinética del calor, sugirió que esos movimientos moleculares podrían dar alguna explicación al fenómeno (Perrin, 2005).

Algunos años después (entre 1887 y 1880), el padre Carbonnelle y el padre Delsaulx sugirieron que el movimiento browniano era un fenómeno universal; es decir, que tal y como se podría concluir de las observaciones y conclusiones por Brown, cualquier material que cumpliera el tamaño y fuera suspendido en cualquier fluido, (de viscosidad baja) podría encontrar este movimiento.

Y cuya explicación confiaban a fenómenos termodinámicos. Pero esta visión, o mejor, idea sobre la explicación que podría tener el movimiento browniano no era generalizada, pues existían autores como Dr. Jevons quien consideraba como explicación fundamental interacciones eléctricas en el fenómeno y vibraciones coloidales en los sistemas Brownianos (Nelson, 2001). Tuvieron que ser realizadas muchas experiencias distintas para mostrar la dependencia del movimiento browniano de características como los campos magnéticos y eléctricos.

No obstante todos estos aportes fueron fundamentales para analizar a grandes rasgos las características del movimiento. La primera persona en tomar todos los aportes realizados, corroborarlos con sus observaciones fue M.Gouy quien en 1888 añadió a las características antes mencionadas que el movimiento browniano no dependía de las vibraciones que podían transmitirse al fluido. Generalizó sus observaciones en los siguientes puntos:

1. El movimiento es bastante irregular, compuesto de translaciones y rotaciones, la trayectoria que aparece no tiene tangente<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> Puede considerarse que lo que Gouy quiere decir en este punto, es que no es posible encontrar una ecuación diferencial que describa la trayectoria seguida por una partícula browniana.

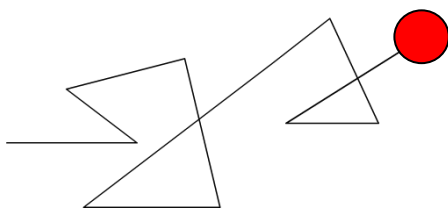
2. Dos partículas se mueven independientemente, aun cuando la distancia entre ellas es menos que su diámetro.
3. El movimiento es más activo en las partículas más pequeñas.
4. La composición y la densidad de las partículas no tienen efecto.
5. El movimiento es más activo, si el fluido es menos viscoso.
6. El movimiento nunca para. (Nelson, 2001)

En cuanto al último punto, “el movimiento nunca para”, el movimiento browniano planteaba un interrogante, el cual consistía en la permanencia del movimiento, es decir el movimiento iba en contra de la segunda ley de la termodinámica que prohíbe los movimientos perpetuos del segundo tipo<sup>17</sup>. En otras palabras el movimiento browniano parecía ser perpetuo.

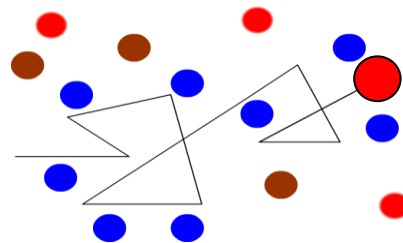
En cuanto a este punto Perrin da una solución bastante ingeniosa:

*“en eso es claro que esta agitación no es contradictoria con el principio de la conservación de la energía, es suficiente que cada incremento en la velocidad de un granulo este acompañado por un “enfriamiento” del líquido que esta inmediatamente en sus vecindades, del mismo modo cada perdida de movimiento debe estar acompañada de un calentamiento local, sin ganar o perder energía” (Perrin, 2005)<sup>18</sup>.*

Es decir, debe ser realizada una interpretación estadística del principio de la conservación de la energía, ya que pensar en una partícula que se mueve incesantemente en todos los grados de libertad posibles, es algo que no puede ser pensado desde la interpretación individual de este principio. Como ejemplo son útiles las siguientes ilustraciones.



**Ilustración 3-2-1. Movimiento de una partícula browniana.**



**Ilustración 3-2-2. Movimiento de una partícula browniana desde un punto de vista estadístico.**

<sup>17</sup> Es decir que parece no existir ninguna pérdida de energía en el sistema a lo largo del tiempo.

<sup>18</sup> *“It is clear that this agitation is not contradictory to the principle of the conservation of energy. It is sufficient that every increase in the speed of a granule is accompanied by a cooling of the liquid in its immediate neighborhood, and likewise every decrease of speed by local heating, without loss or gain of energy” (Perrin, 2005)*

De la comparación de ambas ilustraciones, podemos ver cómo las partículas de movimiento más activo (en rojo) están rodeadas por zonas con partículas menos activas (azules) y como se ha dicho que el movimiento depende de la temperatura, estas zonas deberán ser más frías, por ende, alrededor de las partículas más activas deben existir zonas frías y mientras más nos alejemos de ésta, podremos encontrar partículas de nuevo más activas.

Todo este trabajo y todas las características encontradas por M. Gouy parecían hacer más visible el camino para explicar y teorizar el movimiento browniano, pues para esta época muchos más científicos confiaban en que la teoría cinético-molecular del calor podría ser la explicación que terminaría con el misterio del movimiento browniano.

En 1900 Felix Exner realizó el primer intento de formalización del movimiento browniano desde la teoría cinética del calor, basándose en el teorema de la equipartición de la energía<sup>19</sup>, usando como variable de estudio la velocidad de las partículas brownianas, teniendo en cuenta que ésta es una de las variables más complicadas de medir en este experimento y que en esa época aún no había sido desarrollado el ultramicroscopio (que fue inventado en 1902). Después de todo el desarrollo, Exner encontró velocidades medias que no correspondían a las estimaciones para las velocidades moleculares de la época. No obstante, Exner sugirió que la única diferencia entre las partículas brownianas y las partículas del fluido en el que estaban suspendidas era el tamaño. Conclusión que Einstein compartiría sobre el estudio de este fenómeno.

### **3.3 EINSTEIN Y EL MOVIMIENTO BROWNIANO**

Einstein comenzó sus estudios sobre la teoría cinética molecular del calor sin tener conocimiento de las observaciones concernientes al movimiento browniano, sobre una forma alternativa para determinar las dimensiones moleculares fue su tesis doctoral<sup>20</sup>.

Tiempo después, cuando su teoría sobre partículas con movimientos aleatorios estaba más avanzada, desarrolló su estudio sin confiar al movimiento browniano el papel de

---

<sup>19</sup> Considero que el problema de aplicar el teorema de la equipartición de la energía a los sistemas brownianos, consiste en que la energía no se reparte de la misma forma a todas las partículas, ya que es posible observar unas más activas que otras, lo que se mantiene es la relación de pérdida y ganancia de las partículas en general.

<sup>20</sup> Este trabajo puede ser encontrado en el libro Einstein 1905 un año milagroso Editorial Critica (Einstein, 2001)

fenómeno experimental en el cual se basaban sus predicciones teóricas, en palabras de Einstein *“es posible que los movimientos que serán discutidos aquí, sean idénticos al llamado “movimiento browniano molecular”;* Sin embargo, la información disponible para mí en cuanto a esta última es tan carente de precisión, que pueda formar ningún juicio al respecto.”<sup>21</sup>

A continuación será mostrada una forma simplificada del desarrollo usado por Einstein para la solución del movimiento browniano, haciendo énfasis en las diferencias respecto a las interpretaciones realizadas por los autores mencionados anteriormente.

Es necesario anotar que Einstein sigue riguroso camino sobre la importancia de aplicar la teoría cinética molecular a estos movimientos aleatorios (no el movimiento browniano en ese momento), debido a esto después de realizar su tesis doctoral, partiendo de su idea sobre la ventaja que tiene para este fenómeno comprenderlo desde la presión osmótica entre las partículas y el fluido, muestra un método matemático-estadístico para deducir la presión osmótica para una sección de volumen, desde la termodinámica molecular. No obstante aunque este trabajo es realmente interesante, no será extendido en este trabajo, ya que en palabras del traductor del artículo de Einstein *“... El conocimiento de dichos artículos y de esta sección de este artículo no es esencial para la comprensión de los resultados de este artículo.”*<sup>22</sup>

Se ha encontrado anteriormente las características presentes en el movimiento de partículas en suspensión, además de los avances y desarrollos formulados por los autores mencionados anteriormente, los avances y puntos que se deben tener en cuenta en esta parte del estudio del movimiento browniano, serán de nuevo los mencionados por M. Gouy, los mismos que Einstein citó como comprobación de sus primeros trabajos:

- El movimiento es completamente irregular (aleatorio)

---

<sup>21</sup>*“It is possible that the movements to be discussed here are identical with the so-called ‘Brownian molecular motion’; however, the information available to me regarding the latter is so lacking in precision, that I can form no judgment in the matter.”* (Nelson, 2001)

<sup>22</sup> Las primeras dos secciones del artículo sobre movimiento browniano, son realmente interesantes, pero también requieren un análisis bastante extenso y conocimientos profundos sobre termodinámica estadística, ya que no afectan el resultado final sino que cumplen un papel más “argumentativo” no serán tratados en este trabajo, quien desee profundizar en este tema puede dirigirse a los artículos de Einstein.

- 2 partículas brownianas parecen moverse sin relación entre ellas (independientemente)
- El movimiento es mayor en las partículas más pequeñas
- La composición de las partículas brownianas, la densidad y el material no afectan el movimiento.
- El movimiento depende de la viscosidad del líquido, ya que este es mayor si se disminuye la viscosidad del líquido.
- El movimiento se hace mayor si se eleva la temperatura del sistema.
- El movimiento parece en principio perpetuo (nunca para).

Einstein parte de la siguiente afirmación:

*“en este artículo se demostrará que, de acuerdo con la teoría cinético-molecular del calor, cuerpos de un tamaño microscópicamente visible suspendidos en líquidos, deben realizar, como resultado de los movimiento moleculares térmicos, movimientos de tal magnitud que pueden ser observados fácilmente con un microscopio”.* (Einstein, 2001)

Es claro como Einstein confía en el valor de la teoría cinética molecular en la explicación del fenómeno, pero no de la misma forma que lo hizo Exner.

Einstein considera la presión osmótica uno de los conceptos más importantes dentro de esta explicación y muestra en la primera parte de su artículo el por qué debe ser aplicada y en la segunda parte cómo puede ser deducida desde la teoría cinético molecular del calor.

Este desarrollo está basado en una presentación realizada por el profesor Mario Llano Restrepo PhD, en la época profesor titular de la Universidad del Valle (Restrepo, 2005), no obstante, algunos análisis serán corroborados a partir de las afirmaciones realizadas por Einstein en su artículo original.

Aunque pareciera que Einstein se preocupa en este desarrollo por las partículas en suspensión, su trabajo parece trabajar más con disoluciones y difusiones, ya que a esto

parecieran apuntar los argumentos que usa desde la termodinámica macroscópica<sup>23</sup> que para algunos, no era aplicable a los fenómenos microscópicos.

### 3.3.1 Ley de Van't Hoff para la presión osmótica

Esta ley nos habla de la presión osmótica<sup>24</sup> como el resultado de las colisiones de las partículas del soluto con la membrana semipermeable del disolvente.

Ecuación 3-3-1.

Donde  $\pi$  es la presión osmótica,  $R$  es la constante universal para los gases ideales,  $T$  es la temperatura absoluta y  $c$  es la<sup>25</sup> concentración molar en el fluido.

Imaginemos de este modo un pistón que divide el sistema en una región A y una región B, del mismo modo que la concentración molar en la región A es mayor que en la región B, es decir  $c_A > c_B$ . Si tenemos en cuenta la ley de Van't Hoff, señalando que el sistema está a la misma temperatura absoluta  $T$ , entonces la presión osmótica será mayor en la región A, es decir  $\pi_A > \pi_B$  (véase ecuación 3-1) tal y como se ilustra en la siguiente figura.

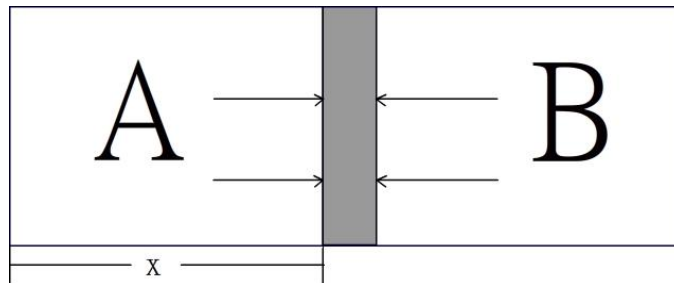


Figura 3-3-1

De este modo es necesario que dentro de este sistema se defina una fuerza externa, necesaria para mantener el pistón en su posición, recordando que las presiones osmóticas no están en equilibrio en este sistema.

<sup>23</sup> Entendiendo termodinámica microscópica como la teoría cinético-molecular del calor

<sup>24</sup> Puede ser entendida como la presión que ejercen las partículas de una disolución sobre una membrana semipermeable cuando existe una diferencia de concentración en el sistema

<sup>25</sup> La concentración molar dentro de un fluido es fácilmente calculable por la relación  $c = \frac{n}{V}$  donde  $n$  son las moles del soluto y  $V$  es el volumen del mismo

Esta fuerza es denominada fuerza activa  $F_a$ , cuya expresión debe estar en términos de las variaciones de presión osmótica y el desplazamiento del pistón. Como se busca que el pistón se mantenga en su posición, el límite que define la fuerza activa deberá ser el siguiente:

$$F_a = -\Delta \pi \cdot A \quad \text{Ecuación 3-3-1-2.}$$

En comparación con la expresión que teníamos para la ley Van't Hoff (Ecuación 3-3-1) tenemos lo siguiente:

$$F_a = -\Delta \pi \cdot A \quad \text{Ecuación 3-3-1-3.}$$

Recordando que la temperatura absoluta  $T$  y  $R$  (constante) en el sistema no cambian. Teniendo esto en cuenta, podemos sacar estas constantes obteniendo:

$$=$$

Se obtiene una expresión para la fuerza activa, esta fuerza está relacionada con la velocidad que puede ser conseguida al moverse en el líquido, esta velocidad  $v$  depende de la viscosidad del líquido es decir del coeficiente de resistencia viscosa  $\eta$  y de la fuerza activa mencionada anteriormente, cuya expresión es  $F_a = -\Delta \pi \cdot A$

Si aplicamos esta relación a una cantidad  $c$  <sup>26</sup>, es decir a la velocidad impartida por esta fuerza a una cantidad grande de partículas, la velocidad impartida por la fuerza activa  $K$  sería

$$v = \frac{F_a}{\eta \cdot A} \quad \text{Ecuación 3-3-1-4.}$$

Remplazando la expresión obtenida para fuerza  $K$

$$v = \frac{-\Delta \pi \cdot A}{\eta \cdot A} \quad \text{Ecuación 3-3-1-5.}$$

Esta velocidad no es del todo desconocida, pues en las difusiones ya era conocida la cantidad  $J$ , que habla sobre el flujo molar de difusión, aunque define un flujo que puede

---

<sup>26</sup> Es importante anotar como esta velocidad, al igual que en las difusiones, afecta a muchas partículas a la vez, generando que en las difusiones estas se muevan de zonas de mayor concentración molar a otras de menor concentración.

ser pensado como continuo, era posible pensarla como el flujo de partículas. Ésta cantidad está definida como  $\frac{1}{V} \frac{dN}{dt}$ , aunque por el momento parezca confuso este desarrollo, será muy útil más adelante, cuando sea dado el paso más ingenioso de Einstein en este desarrollo. Obteniendo que:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \text{Ecuación 3-3-1-6.}$$

De este modo ha sido obtenida una expresión para el flujo molar en términos de los cambios en la concentración molar y de posición (ya que las demás cantidades presentes son constantes o coeficientes). Con esto estamos listos para comprender el siguiente paso, el que diferencia a Einstein de todos los trabajos anteriores y contemporáneos<sup>27</sup>

### 3.3.2 Ley de Fick para la difusión

Conocemos la forma original de la ley de Fick, que es  $J = -D \frac{dC}{dx}$ , Einstein supuso que este coeficiente sería una clave para la explicación del movimiento de las partículas, por eso derivó la ley de Fick respecto al desplazamiento de las partículas para encontrar:

— Y comparando con la expresión obtenida anteriormente

$$\text{Si } J = -D \frac{dC}{dx}, \text{ Y } J = -vC \quad \text{—} \quad D = \frac{vC}{\frac{dC}{dx}} \quad \text{Ecuación 3-3-2-1.}$$

Este coeficiente de difusión D fue el encontrado por Einstein dentro de esta construcción, caracterizando este proceso, Einstein pensó en la interacción entre el fluido y la partícula definida, es importante resaltar en este punto uno de los cambios más importantes del estudio realizado por Einstein, como se puede ver en la derivada usada anteriormente, Einstein piensa siempre en el desplazamiento como la variable que permite caracterizar el movimiento de las partículas, cambiando la velocidad, que fue usada por otros científicos como Exner.

Después de esto, Einstein sugiere que las partículas son esféricas, desde el punto de vista de este trabajo, no solo para aplicar la ley de Stokes, sino además añadiendo una de las variables que habían sido encontradas desde la experiencia a su desarrollo matemático.

---

<sup>27</sup> Con contemporáneo me refiero al trabajo de Marian Smoluchowski, aunque fue publicado en 1906 puede considerarse contemporáneo y cuyo desarrollo es completamente distinto

### 3.3.3 Ley de Stokes

En el marco de la hidrodinámica, Stokes definió una ley que caracteriza la fricción que experimentan los objetos esféricos que se mueven en un fluido viscoso. La expresión definida por Stokes fue la siguiente:

$$\text{Ecuación 3-3-3-1.}$$

Donde  $R$  es el radio de la esfera que interactúa con el fluido viscoso,  $n$  es la viscosidad y  $V$  es la velocidad asociada a la esfera.

Esta Fricción es análoga a la <sup>28</sup>fuerza de arrastre, es usada para añadir dos variables experimentales al desarrollo matemático, el radio de la esfera y la viscosidad del fluido  $n$ , aumentando la comparación experimental. A continuación encontraremos la expresión para .

Recordando la ley de Stokes

$$\text{Ecuación 3-3-3-2.}$$

Ahora bien, tenemos definido el coeficiente de resistencia viscosa para el fluido en términos del radio y la viscosidad del líquido. El siguiente paso es definir el coeficiente de difusión con esta relación, recordando que  $D = \frac{RT}{6\pi n R}$  (Como habíamos deducido anteriormente) podemos remplazar fácilmente encontrando la formula definida por Einstein para el coeficiente de difusión.

$$\text{Ecuación 3-3-3-3.}$$

De este modo se puede volver a usar este coeficiente de difusión en la ley de Fick, pero en esta ocasión en su forma dependiente del desplazamiento cuadrático de las partículas en difusión.

---

<sup>28</sup> La fuerza de arrastre se define como

desde las formulaciones de Van't Hoff

Donde  $t$  es el tiempo difusión, como nuestra problemática es caracterizar el desplazamiento de las partículas brownianas podemos despejar el desplazamiento para obtener:

30

Finalmente se puede reemplazar en esta fórmula para el desplazamiento obteniendo finalmente una relación entre el desplazamiento de partículas en difusión (un sistema análogo al browniano) y las características observadas experimentalmente desde la época de Robert Brown, además encontrando la relación entre los desplazamientos y el número de Avogadro.

Ecuación 3-3-3-4.

Es así como finalmente tenemos una relación matemática que relaciona muchas de las variables y coeficientes que se había dicho deberían estar presentes, tales como la temperatura absoluta, el tamaño de las partículas representadas por su radio y la viscosidad del líquido.

Teniendo esta expresión, el siguiente pasó en palabras de Einstein “*esperemos que algún investigador consiga pronto resolver el problema aquí presentado, que tan importante es para la teoría del calor*” (Einstein, 2001). Habiendo obtenido una expresión lo que quedaba era comparar sus resultados con los montajes experimentales. Utilizando el ultramicroscopio, Svedberg realizó las primeras medidas precisas sobre el movimiento browniano, no obstante Einstein en un artículo posterior (tal vez para corregir diferencias conceptuales con Svedberg) que las velocidades obtenidas a partir del teorema de la equipartición de la energía, no son observables experimentalmente, Einstein no estaba confiado de que fuera posible obtener hasta que Jean Perrin y sus estudiantes, publicaron su estudio completo sobre el fenómeno, a lo que en Einstein

<sup>29</sup> Véase Apéndice A (anexos)

<sup>30</sup> Esta expresión también se puede obtenerse de la solución en una dimensión a la forma diferencial de la ley de Fick.

escribió “Yo hubiera considerado imposible investigar el movimiento browniano de forma tan precisa; es un golpe de fortuna para este tema que usted lo haya asumido” (Einstein, 2001).

### 3.4 EL TRABAJO EXPERIMENTAL DE JEAN PERRIN

Perrin en la sección 29 de su libro “*Brownian Movement And Molecular Reality*”, la cual lleva como título “*Experimental confirmation of Einstein’s theory*” realiza una descripción del procedimiento experimental llevado a cabo para hallar experimentalmente el número  $N$  teniendo la posibilidad de medir experimentalmente el desplazamiento cuadrático medio de la partícula.

Perrin preparó algo que él llama “Camera Lucida” que parece ser una especie de proyector<sup>31</sup> que permitía aumentar la imagen del microscopio y ubicarla en un papel cuadrado, en el cual se tenían dos ejes rectangulares, en el cual diferentes segmentos de desplazamiento podían ser obtenidos fácilmente. (Es decir los segmentos de los desplazamientos podían ser fácilmente medidos uno a uno) teniendo controladas todas las variables y con la posibilidad de medir fácilmente el desplazamiento cuadrático de las partículas, solo restaba (según Perrin) comparar con los valores obtenidos para  $N$  por la ecuación de Einstein.

Así tenemos los siguientes datos que Perrin pone en la sección de su libro y las series que fueron encontradas por M. Chaudesaigues:

Time in seconds.	Mean Horizontal Displacement (in $\mu$ ).	$\xi^2 \times 10^{-8}$ .	$N \times 10^{-22}$ .	$N$ (mean).
30	8.9	50.2	66	$73 \times 10^{22}$
60	13.4	113.5	59	
90	14.2	1.8	78	
120	15.2	144	89	

Figura 3-4-1 Primera serie de desplazamientos y valores de  $N$  descritos (Perrin, 2005), Pág 60.

Primera serie.

Radio  $R = 0.212\mu$

Fluido = Agua

Viscosidad = 0.011

Temperatura =  $17^\circ$  (Considero  $^\circ\text{C}$ )

Material Browniano = *Gamboge*

<sup>31</sup> Considero que habla de un proyector que permite aumentar la imagen del microscopio, ya que sobre la proyección del movimiento browniano a un auditorio trata la primera parte de su libro.

Para la segunda serie solo se propone un cambio en la viscosidad del agua utilizada. También debe señalarse que el material usado, *Gamboge*, aunque en el texto de Perrin no se hace explícito qué es (es posible imaginar que era muy común y conocido) es una resina que puede ser extraída de cierto tipo de árboles.

*Second Series.*

Time in seconds.	Mean Horizontal Displacement (in $\mu$ ).	$\xi^2 \times 10^{-8}$ .	$N \times 10^{-22}$ .	N (mean).
30	8.4	45	68	$68 \times 10^{22}$
60	11.6	86.5	70.5	
90	14.8	140	71	
120	17.5	195	62	

Figura 3-4-2 Segunda serie de desplazamientos y valores de N descritos (Perrin, 2005), Pág 61.

Segunda serie.

Radio  $R = 0.212\mu$

Fluido = Agua

Viscosidad = 0.012

Temperatura = 17° (Considero °C)

Material Browniano = *Gamboge*

Como es posible observar en las series, muchos de los valores no se acercan y otros no son aceptables para la comprobación de la fórmula de Einstein, Perrin reconoce los errores en estas dos series y los atribuye a un mal manejo de los datos experimentales y a dificultades inherentes al experimento.

Perrin decide realizar una segunda confirmación de la fórmula de Einstein corrigiendo problemas como el calentamiento del agua, en esta ocasión usaría granos de “*mastic*”<sup>32</sup> mucho más grandes (de alrededor de  $0.52\mu$ ), el dispositivo fue puesto en una celda llena de agua cuyo objetivo evitar todo posible calentamiento del agua en la preparación, ya que esto puede cambiar drásticamente los resultados de la viscosidad. Además, la temperatura era medida introduciendo un termómetro en el tubo del microscopio en contacto con el objetivo.

Perrin relata que hicieron dos series de mediciones, para cada gránulo en un intervalo de 30 segundos, para cada serie un intervalo de 30 segundos corresponde a 200 puntos, el intervalo de 60 segundos corresponde a 100 puntos, y pone los resultados en la siguiente tabla.

<sup>32</sup> Masilla, una emulsión uniforme preparada en el laboratorio para este experimento

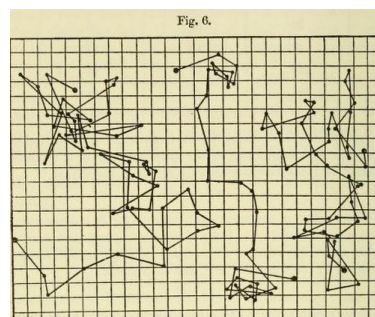
Time in seconds.	$N \times 10^{-22}$ .	
	First Series.	Second Series.
30	57	69
60	64	65
120	67	64
240	70	88

**Figura 3-4-3 Primera y Segunda serie de valores de N descritos para la segunda comprobación de la fórmula de Einstein. (Perrin, 2005), Pág 63.**

Más adelante Perrin realiza una medición distinta, para 200 gránulos midiendo la magnitud de su desplazamiento por dos minutos, según las mediciones de Perrin, estas mediciones le dieron un valor para N de  $77 \cdot 10^{22}$ <sup>33</sup>, estas mediciones para el valor N, según él, son un valor compuesto y de acuerdo con las convenciones más aplicas de las cuales se pueden dotar estos números, están entre  $72 \cdot 10^{22}$  y  $74 \cdot 10^{22}$ , y eso es alrededor de  $73 \cdot 10^{22}$ .

Después muestra una comparación con los datos obtenidos anteriormente para la gamboge, diciendo que las mediciones que ya habían sido realizadas con ésta, es decir que los 3000 desplazamientos juntos indicaban un valor para N de  $71.5 \cdot 10^{22}$  y que este valor estaba de acuerdo con el valor de  $70.5 \cdot 10^{22}$  (probablemente un poco más cerca) que él había obtenido por un método fundamentalmente distinto usado primero.

Finalmente muestra una figura obtenida trazando los segmentos en posiciones consecutivas cada 30 segundos de los gránulos de “mastic”, diciendo es el cuadrado de estos segmentos los que comprueban la fórmula de Einstein.



**Figura 3-4-4 Dibujo de los desplazamientos obtenidos. (Perrin, 2005), Pág 64.**

<sup>33</sup> En realidad sabemos que es  $77 \cdot 10^{22}$ , pero esa es la forma en la que Perrin lo escribe así, por lo tanto de esta forma serán puestos los resultados obtenidos por él.

Perrin termina sugiriendo que este último paso en su trabajo experimental para comprobar el trabajo de Einstein muestra una pretensión para encontrar una demostración geométrica sobre la existencia de una tangente a cada punto en una curva, además sugiere la posibilidad de ser más específicos en el dibujo del desplazamiento de las partículas, sugiere que este dibujo podría ser realizado segundo a segundo, no sin antes advertir sobre las dificultades experimentales de esta técnica.

## **CAPITULO 4. EL MOVIMIENTO BROWNIANO** **EN EL AULA**

En los capítulos anteriores se ha hecho algunos análisis y todo un recorrido sobre los problemas que plantean lo continuo y lo discreto para el conocimiento, sobre como las discusiones y las diferentes visiones del mundo de los científicos se confrontan dependiendo de su extensión explicativa y sobre las inferencias y significados que el movimiento browniano, su observación y su formalización permiten alcanzar alrededor de la teoría atómica de la materia y como ésta puede tomar un mayor significado desde la experiencia mostrada por este fenómeno.

Este recorrido permite plantear muchas inquietudes alrededor de las posibles ventajas o desventajas que podría tener el movimiento browniano a la hora de ampliar la base fenomenológica, explicativa y argumentativa de los estudiantes, en otras palabras, la pregunta que puede ser planteada alrededor de esta parte trabajo es la siguiente. Si bien el estudio de los problemas de la continuidad y discontinuidad en los fenómenos es importante para la comprensión de estas teorías y la experimentación permite construir explicaciones y hacerse preguntas sobre la naturaleza ¿en qué aporta la experiencia del movimiento browniano a la argumentación de las ideas atómicas de la materia? Esta pregunta, es una muestra clara de la inquietud del trabajo respecto a ciertos problemas alrededor de la enseñanza de la física, específicamente la teoría atómica de la materia desde una base experimental.

En un impulso por responder esta pregunta, se plantean algunas actividades experimentales para ser realizadas en el aula de clase, estas experiencias son la base de la observación del movimiento browniano y una de las actividades de observación mencionada en el capítulo anterior y descrito por Perrín.

Esta experiencia en el aula de clase busca caracterizar las explicaciones asociadas por los estudiantes al movimiento browniano, teniendo en cuenta que no fue realizada ninguna formalización ni descripción del fenómeno antes de las actividades, se buscaba que toda esta explicación y variables asociadas fueran completamente de los estudiantes.

Gracias a unas preguntas preparadas<sup>34</sup> para evidenciar todo lo anterior y a algunas observaciones que permitía el montaje experimental, se obtienen las diferentes evidencias que serán estudiadas a lo largo de este capítulo, describiendo de una manera explícita los criterios de análisis que fueron planteados para las actividades y para las preguntas que respondieron los estudiantes.

#### **4.1 DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN**

La actividad fue realizada en el colegio de hermanos maristas Champagnat de Bogotá, ubicado en la localidad de Teusaquillo, un colegio privado en donde se encuentran estudiantes de estratos económicos entre 3 y 5, el colegio se caracteriza por tener un proyecto pedagógico propio basado en la importancia de la experimentación en la enseñanza de las ciencias.

La población estudiantil con la que se realizaron las actividades fueron estudiantes de grado décimo y once cuyas edades se encuentran entre los 15 y 17 años. El espacio académico cedido por la institución fue la clase de Proyecto cuyo objetivo es fortalecer los conocimientos de los estudiantes, dependiendo de las necesidades de su orientación profesional, el grupo con el que se trabajó fue alrededor de 20 estudiantes que pertenecían a las ingenierías, es decir, a los estudiantes cuya preparación en conocimientos específicos iba direccionado hacia carreras profesionales como ingeniería civil, de sistemas, mecánica etc.

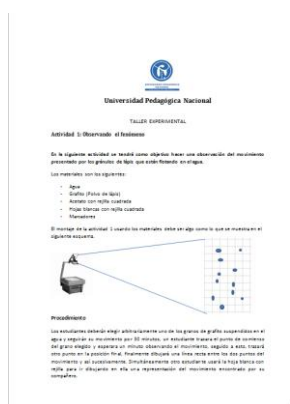
Es importante señalar que los estudiantes de los grados decimo y once estudian simultáneamente éste espacio académico, debido a que la preparación profesional de los estudiantes comienza desde grado décimo. Esto fe un punto muy importante para la actividad, ya que garantiza diversidad en las explicaciones, no solo desde la perspectiva explicativa del sujeto, sino desde la perspectiva misma que el conocimiento aporta a los estudiantes.

---

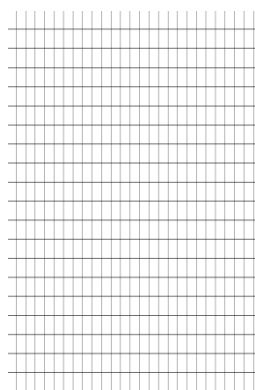
<sup>34</sup> Véase anexo guía de laboratorio

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

A partir del análisis de los capítulos anteriores, de las experiencias, explicaciones y caracterizaciones encontradas en los diferentes textos y autores alrededor del movimiento browniano, se construyó un contexto problemático alrededor de la teoría atómica de la materia y el papel de éste en la argumentación de la misma. A partir de esto se propone la construyó una guía de laboratorio (ver anexo) que se basaba en dos experiencias, que desde la perspectiva de este trabajo son la base para la construcción fenomenológica en este experimento. A continuación unas imágenes de la guía construida.



**Foto 4-2-1.**  
**Página 1 guía.**  
**(Véase anexo)**



**Foto 4-2-2.**  
**Cuadrícula.**  
**(Véase anexo)**

La primera experiencia fue basada en uno de los montajes mencionados por Perrin, en la cual menciona a grandes rasgos que el movimiento puede hacerse visible a todo un auditorio usando un proyector normal con una película delgada de agua y algún material granular muy fino, se usó como material granular o en otras palabras como partículas brownianas, grafito, material usado comúnmente en las cerrajerías para arreglar chapas de puertas, este material es fácil de conseguir y es de gran utilidad en la experiencia, no obstante el grafito tiene que ser muy fino (de muy buena calidad) para que funcione en óptimas condiciones en la experiencia.

Se propuso que 4 estudiantes eligieran una partícula de grafito y siguieran su movimiento en el tablero, trazando puntos y uniendo las trayectorias seguidas por los gránulos de grafito con líneas rectas, simultáneamente un estudiante aprovechando la cuadrícula usada en el experimento y una cuadrícula que fue entregada a los grupos de trabajo, recreaba la representación del movimiento encontrada por su compañero en su cuadrícula.

A continuación, algunas fotos de la primera actividad:



**Foto 4-2-3. Actividad Estudiantes siguiendo el movimiento.**



**Foto 4-2-4. Actividad Montaje experimental.**



**Foto 4-2-5. Actividad Montaje y resultados de la experiencia.**

Finalizada esta parte de la experiencia, los estudiantes debían responder una serie de preguntas sobre esta experiencia que nos permitió hacernos a una idea más clara sobre las explicaciones asociadas al fenómeno que estaban observando.

Después de resolver las preguntas, pasaban a la actividad 2 que consistía básicamente en una repetición de las observaciones realizadas por Brown, infortunadamente el polen de la planta usada por Brown, no pudo ser conseguido, así que de nuevo se usó el grafito como material en suspensión y agua como fluido.

La diferencia respecto a la primera actividad, es que en ésta se realizaban las observaciones del movimiento browniano con un microscopio, recreando la forma en la que Brown lo describió por primera vez. A continuación, algunas fotos de la segunda actividad.



Foto 4-2-6. Actividad 2 microscopio usado



Foto 4-2-7 Actividad. Estudiante preparando la observación



Foto 4-2-8. Actividad 2 Estudiantes preparando los materiales

Seguido a la observación del fenómeno en el microscopio, los estudiantes tenían que responder una serie de preguntas distintas a las de la actividad 1, cuyo objetivo era caracterizar algunas variables más específicas que afectan al fenómeno, e indagar sobre las descripciones realizadas por los estudiantes alrededor de estas variables.

Como último punto, se pidió a los estudiantes que representaran lo que habían visto en la actividad 2 en un dibujo, esto con el fin de caracterizar la capacidad que tenían los estudiantes para representar el fenómeno observado y si dentro del esquema de representación incluían la representación de sus explicaciones.

## 4.3 RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS ACTIVIDADES

### 4.3.1 Caracterización del fenómeno

Tal y como se puede ver en el enunciado de la primera actividad se pidió a los estudiantes que hicieran en la cuadrícula blanca un esquema del movimiento de las partículas de grafito y que fue representado en el tablero, dado que se representaba simultáneamente el movimiento de partículas distintas en el mismo sistema, los estudiantes pudieron identificar la clara diferencia entre los movimientos de cada una de las partículas de grafito. Como ejemplo tenemos las siguientes fotos que son el resultado de los movimientos encontrados por los estudiantes.

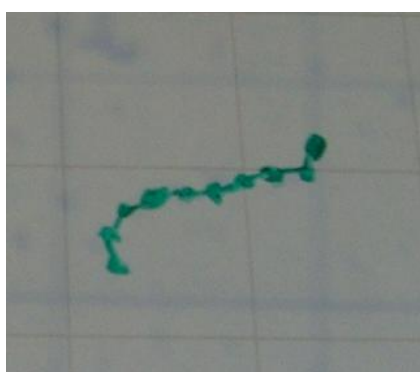


Foto 4-3-1. Movimiento  
Partícula 1

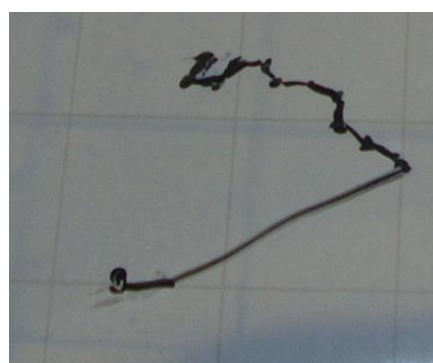


Foto 4-3-2. Movimiento  
Partícula 2

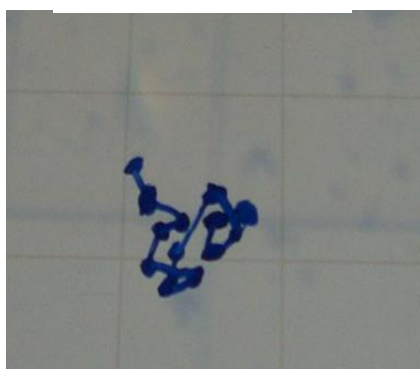
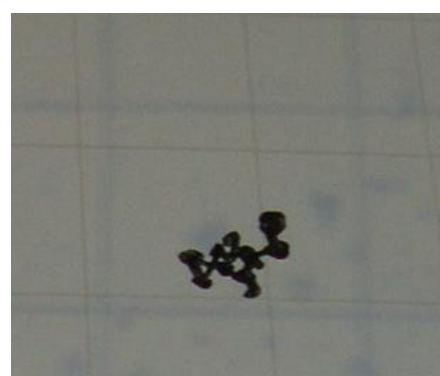
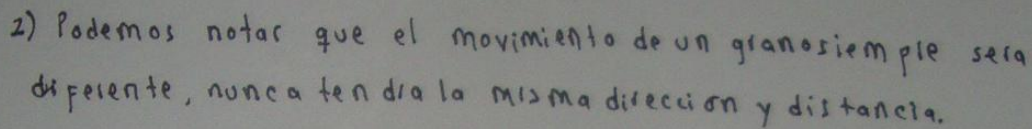


Foto 4-3-3. Movimiento  
Partícula 3



4-3-4. Foto Movimiento  
Partícula 4

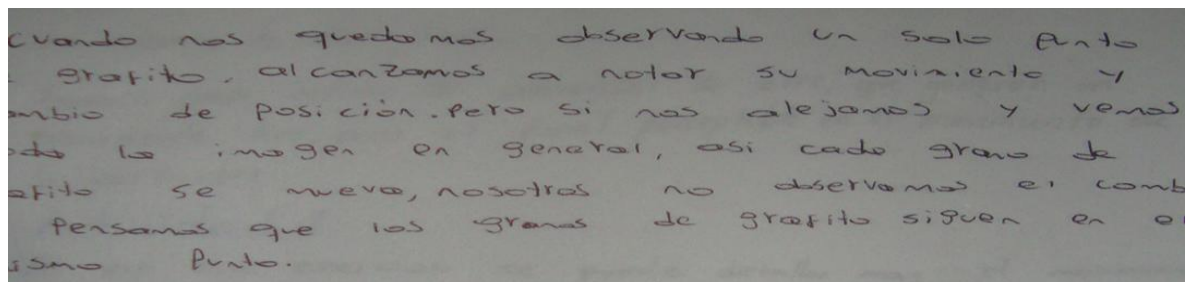
De las fotos se puede concluir que 2 partículas brownianas distintas nunca tendrán el mismo recorrido de un punto a otro, en la comparación de estos 4 movimientos los estudiantes encontraron esta característica del fenómeno, además a esta idea ayudó la comparación de los diferentes esquemas de movimiento que representaron en las hojas blancas con rejilla cuadrada.



2) Podemos notar que el movimiento de un grano siempre será diferente, nunca tendría la misma dirección y distancia.

Foto 4-3-5. Descripción realizada por un grupo de estudiantes sobre el movimiento

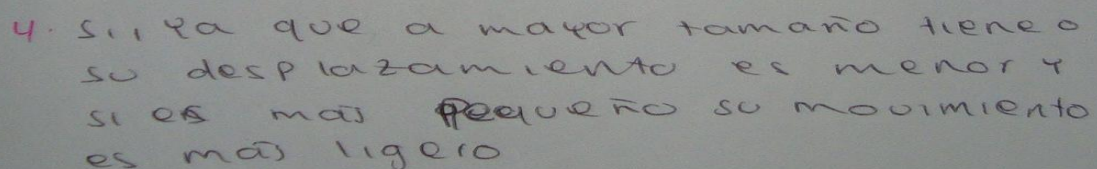
Aunque en teoría puede ser posible encontrar 2 partículas brownianas cuyo desplazamiento cuadrático medio tenga el mismo valor, es claro que dentro de la observación es algo muy complicado de encontrar. No obstante, los estudiantes señalaron que la comparación de los movimientos era posible gracias al trazado realizado por sus compañeros, en otras palabras si se intentara comparar el movimiento de dos partículas brownianas sin tener de antemano el trazo de sus movimientos, es muy complicado en esta actividad y para ellos la sensación del sistema en general es que ninguna partícula se está moviendo, si se observan todas al mismo tiempo.



Cuando nos quedamos observando un solo punto de grafito, alcanzamos a notar su movimiento y cambio de posición. Pero si nos alejamos y vemos toda la imagen en general, así como cada grano de grafito se mueva, nosotros no observamos el cambio. Pensamos que los granos de grafito siguen en el mismo punto.

Foto 4-3-6. Descripción sobre el sistema en general

En cuanto a la caracterización se encontró otro punto, sobre la importancia del tamaño de las partículas de grafito, en la pregunta número cuatro, de la actividad uno, se buscaba indagar sobre la capacidad para caracterizar variables básicas (como tamaño y masa) de los estudiantes alrededor del experimento.



4. Si ya que a mayor tamaño tieneo su desplazamiento es menor y si es más pequeño su movimiento es más ligero

Foto 4-3-7. Descripción 1 sobre el tamaño

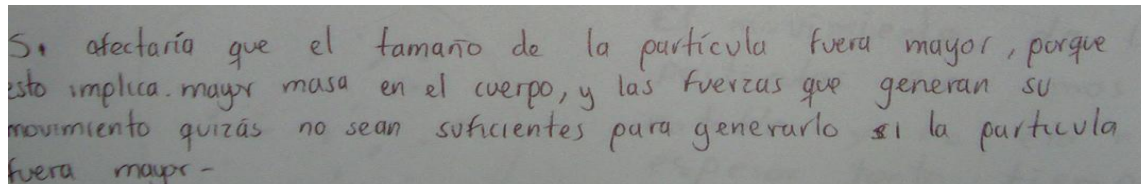


Foto 4-6-8. Descripción 2 Sobre el tamaño

Es interesante ver como los estudiantes asocian el tamaño a la intensidad del movimiento de la partícula, muchos no argumentan la explicación con algo más específico que el tamaño, no obstante algunos estudiantes asociaron la masa al cambio en el fenómeno según lo grande o lo pequeño de gránulo.

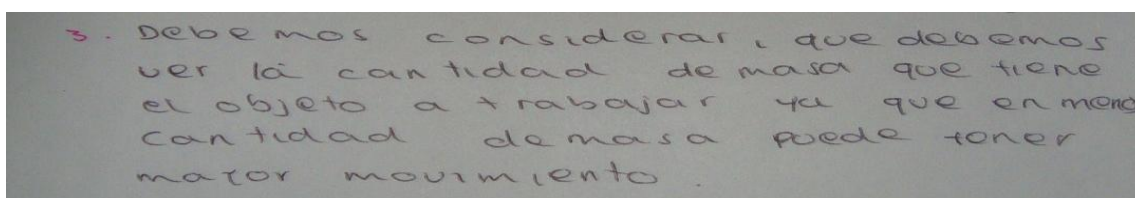


Foto 4-6-9. Descripción realizada sobre la masa

Desde este punto es visible que la caracterización realizada por los estudiantes al fenómeno del movimiento browniano es bastante detallada, a pesar de que no se encuentra una argumentación clara de sus descripciones, si se acercan mucho a las relaciones encontradas por los científicos anteriormente.

#### 4.3.2 Construcción de variables y explicaciones

Como fue mencionado anteriormente, la guía experimental que fue usada en las actividades se construyó pensando en las observaciones realizadas por Robert Brown, por lo tanto se piensa que puede existir una relación o mejor que las explicaciones y descripciones realizadas por los estudiantes a partir de la experiencia con el movimiento browniano pueden de hecho coincidir con las realizadas por Brown en 1827 y que fueron trabajadas en el capítulo anterior de este trabajo.

Para este ejercicio será usado el siguiente cuadro comparativo sobre los diferentes temas que trata Brown, las ideas en su artículo, y lo que describen y explican los estudiantes en las guías de laboratorio.

TEMA EN EL EXPERIMENTO	ROBERT BROWN	ESTUDIANTES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre la primera explicación del movimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dentro de sus ideas sugirió que el movimiento debería deberse a corrientes en el fluido o a la evaporación del mismo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- “Consideramos que la causa del movimiento encontrado por Brown, es la fluidez del agua, debido a que esta siempre está en movimiento.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre el tamaño y su relación con el movimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- “... las moléculas o pequeñas partículas esféricas, en un número considerable y en movimiento evidente, con unas pocas partículas más grandes, cuyos movimientos se manifiestan mucho menos y en algunos casos no son observables”.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- “... afectaría que el tamaño de la partícula fuera mayor, porque esto implica mayor masa en el cuerpo, y las fuerzas que generan su movimiento quizás no sean suficientes para generarlos si la partícula fuera mayor”.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre el fluido en el que se suspenden las partículas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brown en su artículo no realiza ninguna apreciación en especial sobre este aspecto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- “Cambiar fluido en este experimento afectaría el movimiento, ya que un fluido más denso impide un movimiento fácil de una partícula, además también influye la viscosidad del fluido, en suma, cambiar el fluido si afectara el movimiento de las partículas, sea para permitir un movimiento más rápido o sea para reducir el movimiento, pero en todos los casos las partículas se moverán.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conclusión explicativa del experimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El movimiento de las partículas deberá deberse a la combinación de diferentes factores, como las atracciones y repulsiones entre las partículas mismas, su equilibrio inestable, corrientes en el fluido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- “Creemos que el movimiento de las partículas es generado por la constante interacción entre átomos, esto depende de las cargas eléctricas quizás, o de distintos factores como la disposición de los</li> </ul>

	<p>y diminutas burbujas de aire dentro del mismo.</p>	<p>átomos en el fluido y como estos interactúan con átomos de otra clase.</p> <p>También puede influir las corrientes de aire, que generan un movimiento leve, pero al final perceptible en el movimiento de las partículas”.</p> <p>- “la principal causa sería el movimiento de los átomos y su movimiento y densidad del cuerpo que se presenta en la sustancia y la cantidad de átomos que posee”.</p>
--	---	--

Como se puede observar en el cuadro, es posible encontrar relaciones y similitudes entre las explicaciones y observaciones realizadas por Brown y las realizadas por los estudiantes. Aunque muchas de las últimas no poseen una argumentación y una redacción tan finas y ceñidas a la necesidad inmersa en una publicación científica tan rigurosa como la de Brown, son claras las relaciones existentes entre ambas.

Más aún, es posible que los estudiantes guiados por las preguntas planeadas en la guía puedan ir un poco más profundo en sus descripciones, ejemplo de esto son las relaciones que mencionan alrededor de cómo podría afectar el fluido las condiciones que rigen el movimiento browniano.

Algunos estudiantes después de la actividad construyeron argumentos desde una imagen del atomismo afianzado en la experiencia, no en una imagen del mundo desconocida y totalmente ajena a su experiencia cotidiana.

## **CONCLUSIONES**

Después de realizar las reflexiones, el estudio sobre los diferentes problemas necesarios, y la posterior aplicación de la prueba de movimiento browniano en el aula de clases, se obtienen las siguientes conclusiones:

6. El trabajo logró construir un contexto problemático y argumentativo, en este caso alrededor de dos cosmovisiones de la física, la energetista y la atomista, brindando argumentos a favor de la teoría atómica de la materia. Señalando la importancia del movimiento browniano para esta discusión y para la física en general.
7. Plantear los problemas sobre lo continuo y lo discreto es una herramienta útil para los docentes, pues muestra problemas que se pueden presentar en la formulación de experiencias desde las diferentes perspectivas. Y puede ayudar a mostrar una forma distinta del cambio de mirada, basado en la necesidad explicativa y la argumentación.
8. Plantear las controversias científicas, muestra mucho de cómo funciona la sociedad científica, en este caso, muestra como una teoría es elegida sobre otra, no porque sea la “mejor”, sino porque muestra un marco explicativo más amplio de los fenómenos de la naturaleza.
9. El movimiento browniano constituye un argumento experimental fácilmente observable de la teoría cinético molecular del calor, gracias a esto puede constituir una herramienta fundamental en la enseñanza de la teoría atómica de la materia.
10. El movimiento browniano permitió que los estudiantes generaran explicaciones con cierta similitud a las formuladas por Brown, esto muestra que estas no están alejadas de la descripción del fenómeno realizada por los científicos y por ende, muestra que este experimento permite generar formas explicativas dentro de los estudiantes que apuntan a una visión atómica de la materia.

Aunque el experimento logró un primer acercamiento a las explicaciones y descripciones en los estudiantes, es claro que una implementación más extensa de esta experiencia y con una mayor variedad en el trato de las variables implicadas, podría mostrar resultados aún más interesantes sobre las explicaciones realizadas por los estudiantes y podrían afinar su argumentación alrededor de la teoría atómica de la materia.

## Bibliografía

- Alvarez, C., & BARAHONA, A. (2002). Introducción. En *LA CONTINUIDAD EN LAS CIENCIAS* (pág. 14). Mexico D.F: Fondo de Cultura economica.
- Alvarez, C., & BARAHONA, A. (2002). *La continuidad en las ciencias*. Mexico D.F: Fondo de Cultura economica.
- Aristóteles. (1995). *Física*. (G. R. Echandia, Trad.) Gredos S.A.
- Bohr, N. (1949). *Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*. Recuperado el 15 de 9 de 2013, de marxists.org:  
<http://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/dk/bohr.htm>
- Boltzmann, L. (1986). Sobre la energética. En *ESCRITOS DE MECANICA Y TERMODINAMICA* (págs. 102-106). Madrid: Alianza.
- Boltzmann, L. (1986). Sobre la inevitabilidad del atomismo en las ciencias de la naturaleza. En *ESCRITOS DE MECANICA Y TERMODINAMICA* (págs. 107-125). Madrid: Alianza.
- Brown, R. (1827). A BRIEF ACCOUNT OF MICROSCOPICAL OBSERVATIONS made in the monts of june, july and august, 1827 ON THE PARTICULES CONTAINED IN THE POLEN OF PLANTS AND ON THE GENERAL EXISTENSE OF ACTIVE MOLECULES IN ORGANIC AND INORGANIC BODIES.
- Dedekind, R. (1927). *CONTINUIDAD Y NÚMEROS IRRACIONALES*. (J. J. Bares, Trad.)
- Einstein, A. (2001). *Einstein 1905 un año milagroso*. (J. Stachel, Ed., & J. G. Sanz, Trad.) Barcelona, España: CRÍTICA.
- Galilei, G. (1995). *DIALOGO SOBRE LOS DOS MAXIMOS SISTEMAS DEL MUNDO PTOLEMAICO Y COPERNICANO*. Madrid: ALIANZA EDITORIAL.
- Golzález, A. M. (2006). Atomismo versus Energetismo controversia científica a finales del siglo XIX. *Historia y Epistemología de las ciencias*, 411-428.
- Leibniz, W. G. (1894). *Monadologia y discurso de metafisica*. (S. A. Aguilar, Trad.) Madrid: SARPE.
- Machado, O. L. (2009). *Ontology Studies*. Recuperado el 12 de 8 de 2013, de  
<http://www.ontologia.net/studies/>
- Nelson, E. (2001). *Dynamical Theories of Brownian Motion*. Princeton University Press.
- Ostwald, W. (1911). *La Energía*. Madrid: Libreria Gutenberg de José Ruiz.
- Perrin, J. (2005). *Brownian Movement And Molecular Reality*. (F. SODDY, Trad.) New York: Dover Publications.
- Poincare, H. (1913). *Ultimos Pensamientos*.
- Restrepo, M. L. (17-18 de Febrero de 2005). *ALBERT EINSTEIN Y EL MOVIMIENTO BROWNIANO*. Obtenido de Universidad Del Valle:  
[http://www.univalle.edu.co/~fisica/coloquio/Movimiento\\_Browniano.pdf](http://www.univalle.edu.co/~fisica/coloquio/Movimiento_Browniano.pdf)
- REYES, J. D. (s.f.). LA ORGANIZACIÓN DE LA EXPERIENCIA Y LA ELABORACIÓN DE CONCEPTOS.
- Uribe, F. V. (2006). Albert Einstein Una explosión de genialidad. *Revista Escuela Colombiana De Ingenieria*, 32-39.

# ANEXOS

# Apéndice A

---

## Deducción de la forma de desplazamiento cuadrático de la ley de Fick.

La siguiente es una reconstrucción del camino seguido por el profesor Fabio Vélez de la Universidad Pedagógica Nacional sobre como deducir la forma cuadrática de la ley de Fick, presentada en su artículo *Albert Einstein Una explosión de genialidad (véase bibliografía)*.

Imaginemos un sistema difusivo el cual está separado por un plano imaginario E, y que las concentraciones molares  $c_1$  y  $c_2$  no son iguales.

Del mismo modo podremos definir en el sistema una variación de distancia que recorren las partículas del soluto que será llamada  $\Delta x$  a cada lado del plano E. Tal y como lo muestra la siguiente figura.

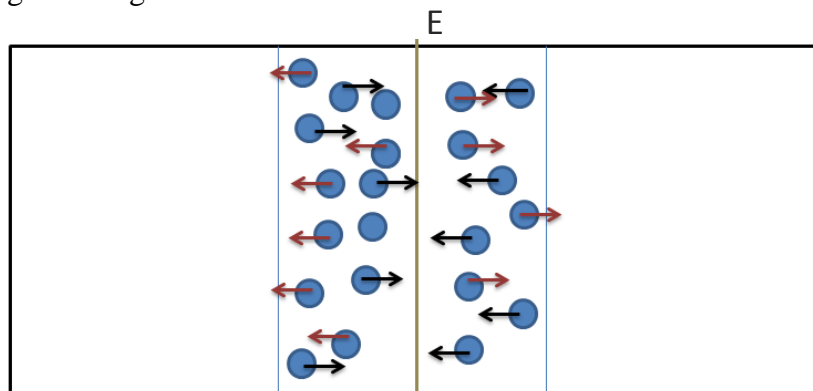


Ilustración 1. Sistema difusivo

Es claro que el movimiento puede darse en todos los grados de libertad que tienen las partículas, no obstante, consideraremos que el único en el que se moverán las partículas, será a lo largo del eje X. Dado esto, es posible considerar que estadísticamente las partículas tienen la misma probabilidad de moverse hacia la derecha que a la izquierda, entonces para la región de  $\Delta x$  la cantidad de partículas que atraviesan el plano E viene dado por la expresión.

$$- \Delta V$$

Donde  $\Delta V$  es la cantidad de soluto (medido en moles) que pasa por el plano E y depende de la variación de volumen que llamamos  $\Delta V$ .

Por un razonamiento similar es posible obtener la expresión para la región que sería la siguiente.

$$- \Delta V$$

Si se quisiera contar la cantidad de soluto que pasa por el plano E de derecha a izquierda<sup>35</sup> está dado por la expresión:

$$- \quad ) = - \quad )$$

Ahora bien, si pensamos en la variación de volumen esta variación viene dada únicamente por el cambio de desplazamiento que habíamos llamado . Tal y como lo muestra la siguiente figura.

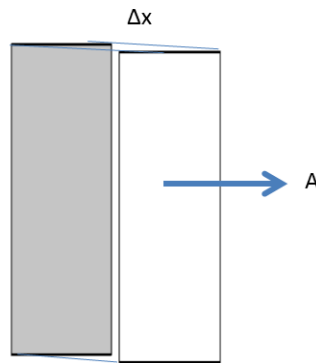


Ilustración 1. Otra vista del sistema

Como se puede ver en la figura, el plano A se mantiene constante y todas las variaciones de volumen podrán ser expresadas como:

$$x \quad \text{entonces} \quad \Delta V = A\Delta x$$

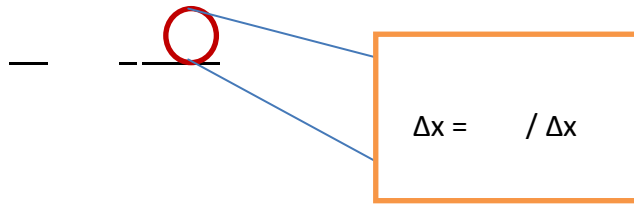
Reemplazando en la expresión que se había obtenido.

—

Con esta expresión, es posible comenzar a buscar las variaciones de la cantidad de soluto en el tiempo y sus dependencias con las variaciones de concentración y volumen, como primer paso se plantea aplicar un intervalo a toda la expresión, obteniendo:

---

<sup>35</sup> Desde mi punto de vista para entender el por qué se resta la expresión de debe pensarse en una medida de la cantidad de soluto en un tiempo específico, si solo se desea saber la cantidad de será necesario restar la cantidad de soluto que va de derecha a izquierda y que se encuentra en ese instante en el plano E, es decir



$\Delta x$  se usa como un método matemático para obtener los desplazamientos al cuadrado de las partículas del soluto, organizando la expresión, tenemos.

— — — — —

Cómo es posible ver en la ecuación, a partir del razonamiento se han encontrado las siguientes relaciones:

- Variación de cantidad de soluto por intervalo de tiempo.
- Variación de la concentración por intervalo de distancia.
- Variación del intervalo de distancia cuadrado por intervalo de tiempo.

Ahora lo que se propone es hacer las variaciones infinitamente pequeñas, para obtener la siguiente expresión:

— — — — —

Es necesario tener en cuenta que las variaciones de  $\Delta x$  no son continuas, es decir que  $\Delta x$  puede ser entendido como el promedio de los desplazamientos en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , según lo anterior, la ecuación puede ser escrita:

— — — — —

Sí se supone que el valor medio del cuadrado  $\overline{\Delta x^2}$  de los desplazamientos es aproximadamente igual al cuadrado del valor medio de los desplazamientos  $\bar{\Delta x}^2$ . Entonces podremos reescribir la expresión de la siguiente forma.

— — — — —

La cual concuerda con la ley de Fick, que tiene la siguiente forma cuando hablar de una flujo a través de un área determinada:

— — — — —

Si igualamos la ley de Fick con la expresión obtenida anteriormente, tenemos:

$$- \frac{dC}{dx} = - \frac{dC}{dx}$$

Simplificando y organizando obtenemos:

$$- \frac{dC}{dx}$$

Finalmente se obtiene una expresión del desplazamiento cuadrático de las partículas dependiente del coeficiente D.

$$\frac{d^2C}{dx^2}$$

Que era lo que se quería encontrar.

## Universidad Pedagógica Nacional

### TALLER EXPERIMENTAL

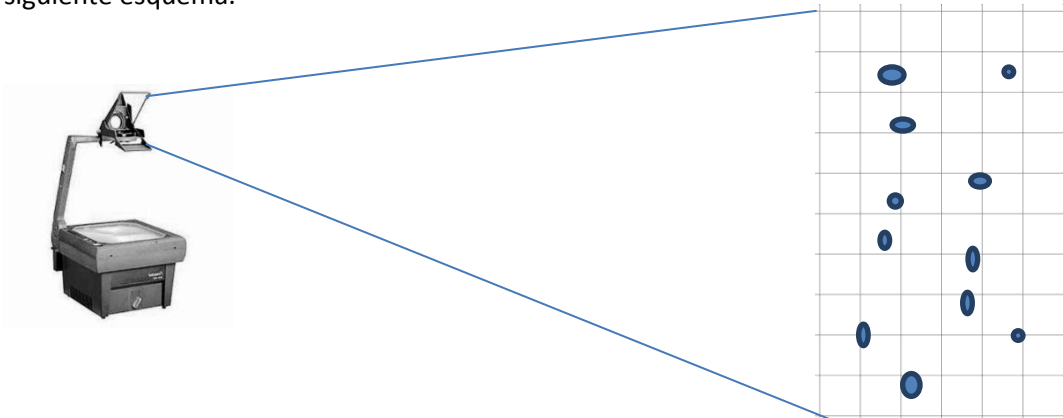
#### Actividad 1: Observando el fenómeno

En la siguiente actividad se tendrá como objetivo hacer una observación del movimiento presentado por los gránulos de lápiz que están flotando en el agua.

Los materiales son los siguientes:

- Agua
- Grafito (Polvo de lápiz)
- Acetato con rejilla cuadrada
- Hojas blancas con rejilla cuadrada
- Marcadores

El montaje de la actividad 1 usando los materiales debe ser algo como lo que se muestra en el siguiente esquema.



#### Procedimiento

Los estudiantes deberán elegir arbitrariamente uno de los granos de grafito suspendidos en el agua y seguirán su movimiento por 30 minutos, un estudiante trazará el punto de comienzo del grano elegido y esperará un minuto observando el movimiento, seguido a esto, trazará otro punto en la posición final, finalmente dibujará una línea recta entre los dos puntos del movimiento y así sucesivamente. Simultáneamente otro estudiante usará la hoja blanca con rejilla para ir dibujando en ella una representación del movimiento encontrado por su compañero.

Después de finalizar la actividad 1, responda las siguientes preguntas:

1. ¿Qué sucede con los granos de grafito?
2. Si usted se aleja del grano que eligió y ve todo el sistema ¿puede notar algo?
3. ¿Qué considera usted que podría ocurrir si en vez de grafito se usa otro material?
4. ¿cree usted que el tamaño del grano de grafito usado tiene que ver en el movimiento? ¿Por qué?
5. Si cambiamos el fluido (agua por alcohol o aceite) ¿se verá afectado el movimiento observado? ¿Por qué?

## EL MOVIMIENTO BROWNIANO



Foto 1 Robert Brown

En 1827 el botánico Escocés Robert Brown observó sorprendido que las partículas de polen suspendidas en agua (flotando en agua) se movían sin ningún orden específico, es decir, el experimento parecía mostrar que el polen de las flores era una forma de vida no reconocida en ese momento, más aun, parecía mostrar que tenía voluntad propia, ya que cada grano pequeño de polen parecía moverse sin ningún orden preestablecido.

Mucho después, en su interés por descubrir la naturaleza de este movimiento aleatorio, Robert Brown decidió repetir sus observaciones con un material inerte como lo eran los pequeños granos de caucho que uso en sus experimentos posteriores, él encontró con extrañeza que aun los materiales reconocidos como no vivos, presentaban el mismo movimiento del polen, y que si se dibujaba el camino recorrido por uno de esos granos, el dibujo sería algo como lo que se puede ver a continuación:



Ilustración 2 Esquema típico de un movimiento browniano

¿Cuál considera usted que podría ser la causa del movimiento encontrado por Brown?

---

---

---

---

### 3. Actividad 2: Un poco más cerca

En esta parte serán realizadas observaciones un poco más específicas sobre este fenómeno de la naturaleza, para lo cual usaremos los siguientes materiales:

- Un gotero
- Un microscopio
- Una placa porta objetos

Usando el gotero, vierta una gota de la suspensión (agua + grafito) en la placa porta objetos y póngala en el microscopio, observe y responda:

1. ¿Qué diferencias encuentra con la primera observación?
2. Represente en un dibujo lo observado en el microscopio
3. ¿Cuáles variables considera usted que intervienen en la explicación de este experimento? Justifique su respuesta.

