

Capítulo 4

Resultados y Conclusiones

Primero se observó que tan evidente era en realidad la dependencia de la fuerza DEP en la frecuencia para el dispositivo y muestra utilizados. Para frecuencias menores a 500 KHz se observó que las partículas continuaban moviéndose libremente o de forma reducida sin quedar atrapadas. Pasando esta frecuencia, las partículas experimentaban una fuerza mucho mayor aumentando con la frecuencia hasta llegar a los 3 MHz que fue la máxima frecuencia utilizada. Ésto era de esperarse ya que la teoría así lo describe (Ecuaciones 2.35 y 2.33) como lo muestra la Figura 2.5.

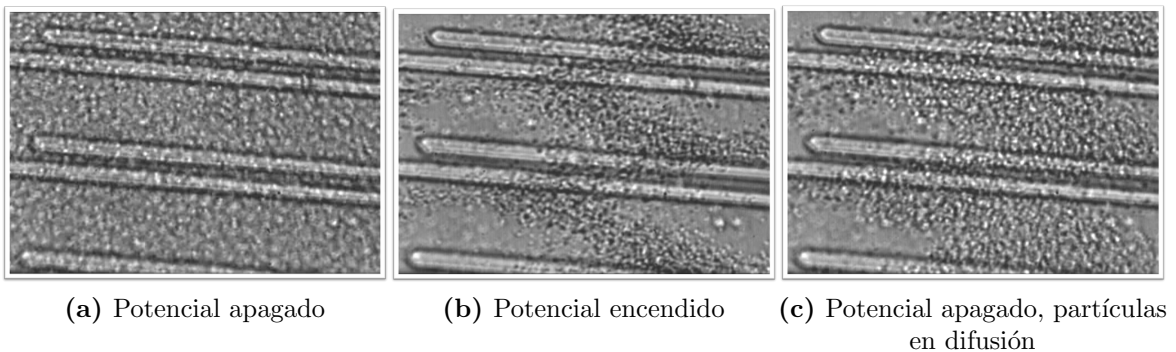


Figura 4.1: Etapas en el atrapamiento de partículas

En la Figura 4.1 se puede ver la evolución en el atrapamiento de una suspensión coloidal. En la Figura 4.1a las partículas se encuentran totalmente libres y presentan

movimiento Browniano. En la Figura 4.1b el potencial se ha encendido y las partículas quedan confinadas a una región bien definida. Estas regiones de confinamiento se observa que no son líneas rectas como se esperaba sino diagonales. Esta inclinación de las regiones se debe a efectos de las puntas de los electrodos pues aparentemente son suficientemente cortos como para influir de esta forma en los potenciales generados. Finalmente en la Figura 4.1c el potencial ha sido a apagado y las partículas comienzan a difundirse por movimiento Browniano.

Se escogieron los valores de $20V_{p-p}$ para la amplitud y $3MHz$ para la frecuencia ya que estos daban la máxima fuerza DEP y se prosiguió a rectificar el movimiento de una partícula. En la Figura 4.2 se observa este proceso.

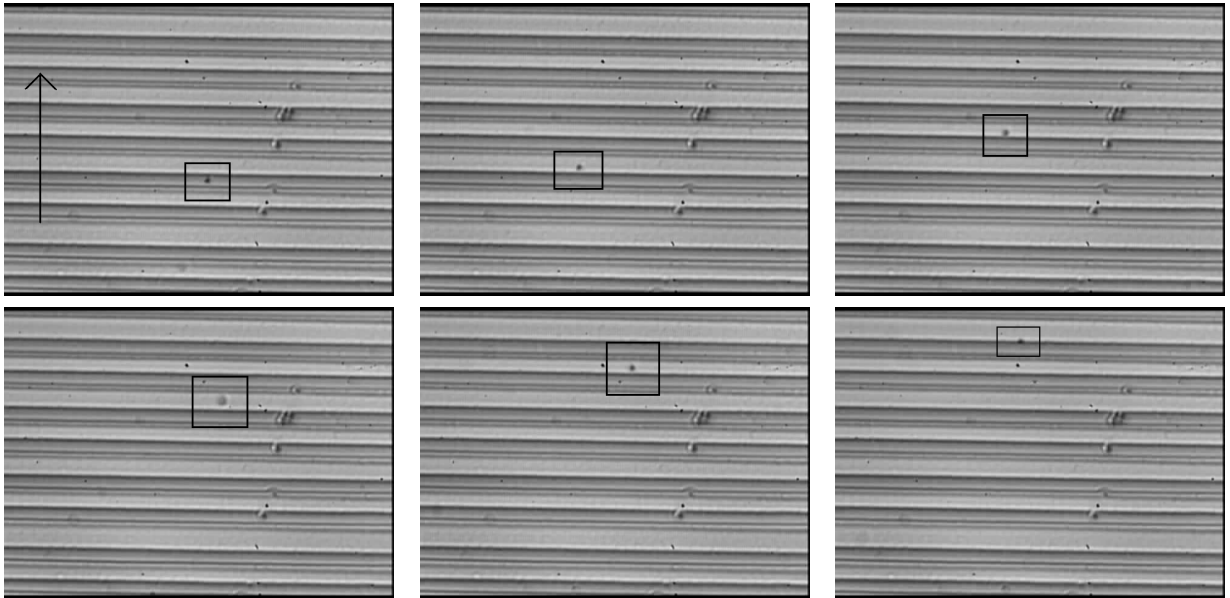


Figura 4.2: Evolución de la rectificación de una partícula (0, 10, 47, 58 y 73 segundos)

Para las partículas de $0,5\mu m$ los tiempos utilizados de encendido y pagado del potencial para su rectificación fueron de $t_{on} = 2 \text{ seg}$ y $t_{off} = 6 \text{ seg}$ respectivamente. El tiempo de encendido debía ser ese ya que nuestro dispositivo presenta efectos no deseados en la manipulación de las partículas. Si el tiempo t_{on} era menor, las partículas

no alcanzaban a quedar atrapadas por el potencial y si el tiempo t_{on} era mayor a 2 segundos, las partículas quedaban atrapadas pero comenzaban a desplazarse hacia la punta o extremo del electrodo mas cercano. Creemos que estos efecto de traslación a través del electrodo se deben al campo generado en las puntas de los electrodos. Una posible solución a este problema sería la fabricación de electrodos mucho mas largos para que estos efectos en la zona intermedia del electrodo no sean tan evidentes.

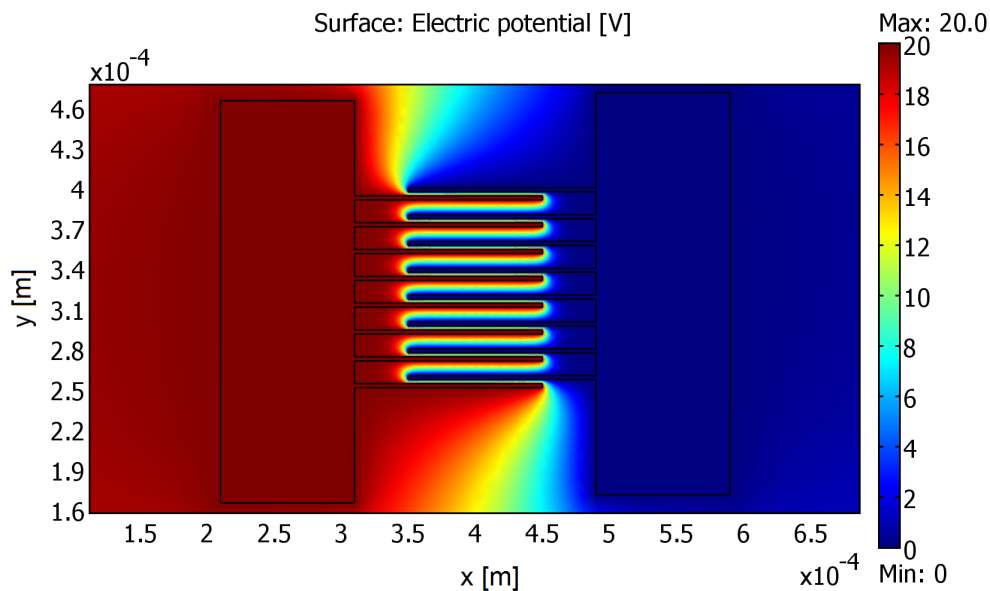


Figura 4.3: Potencial generado por los electrodos visto desde arriba

Los resultados de las simulaciones computacionales se observan en las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6. La gráfica de la Figura 4.3 muestra el potencial visto desde arriba sobre el plano de los electrodos. La variación del potencial entre los electrodos es de forma lineal, por lo que el campo eléctrico en ese plano es constante en esas regiones. En la Figura 4.4 se observa claramente la asimetría de potencial, mostrando los máximos y mínimos que es donde se encuentra el máximo gradiente del campo eléctrico. En las Figuras 4.6 y 4.5 se observa la dependencia del campo eléctrico en la posición “y”.

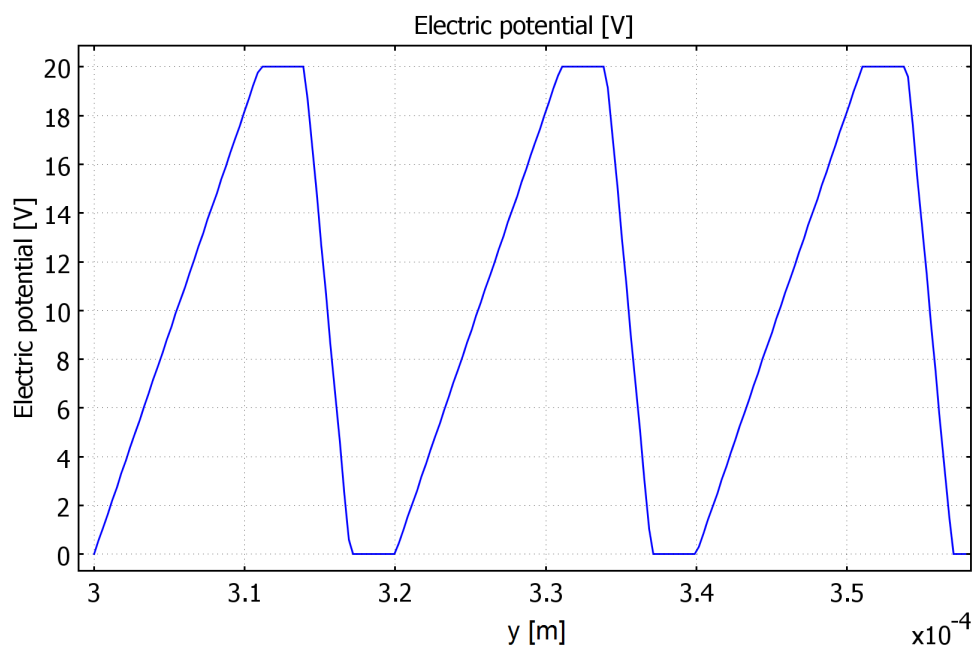


Figura 4.4: Gráfica del potencial en una sección transversal a la mitad de los electrodos. En esta gráfica se observa claramente la asimetría del potencial.

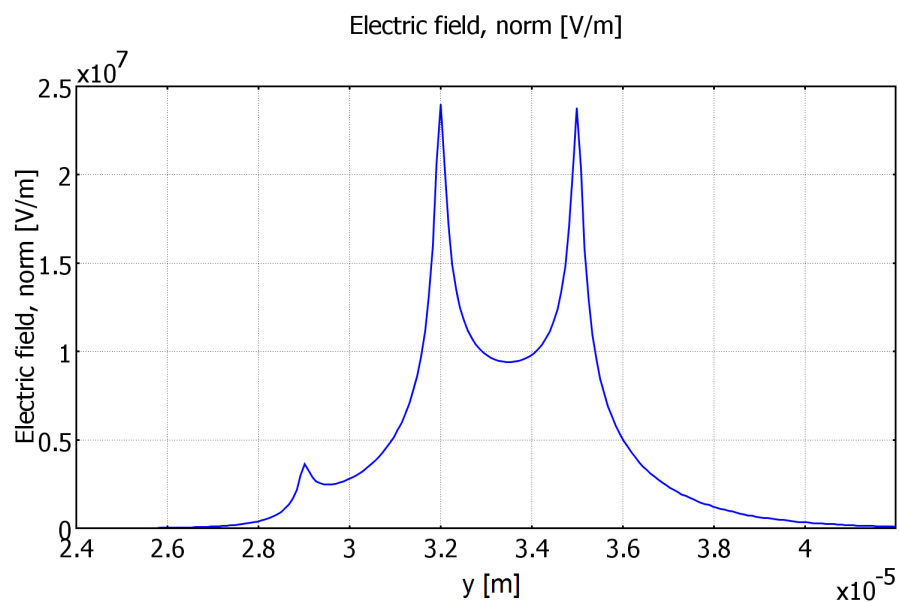


Figura 4.5: Gráfica del campo eléctrico en la dirección de rectificación en el plano paralelo al de los electrodos a una altura de $0,1\mu m$.

Son justamente estas variaciones las que definen nuestra fuerza sobre la partícula según lo predice la Ecuación 2.35

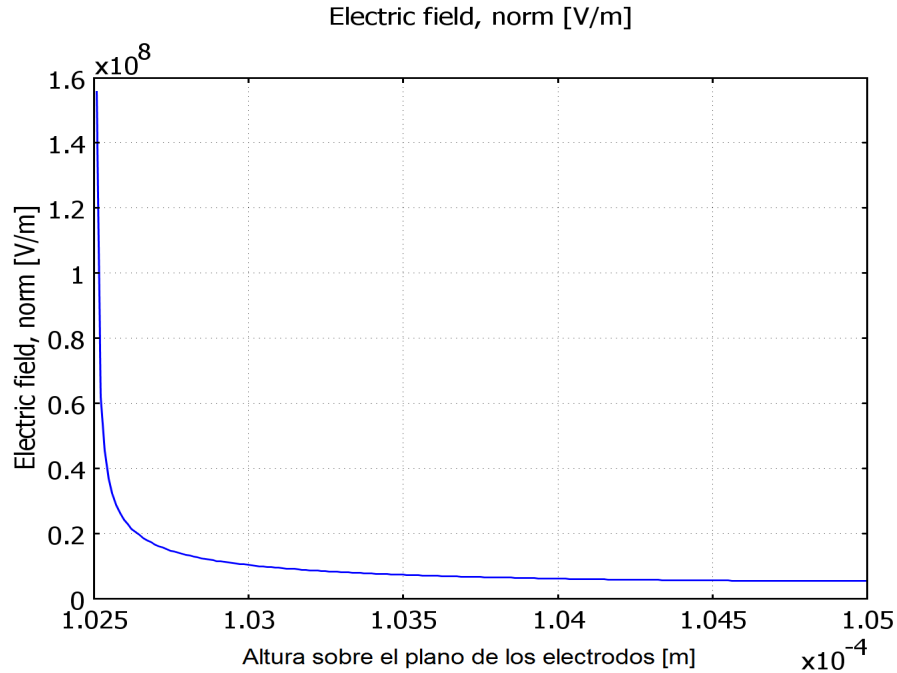


Figura 4.6: Gráfica del campo eléctrico en la dirección perpendicular al plano de los electrodos cerca del borde del electrodo con potencial $V = 20V$.

De la Figura 4.6, se puede observar que el campo eléctrico disminuye rápidamente conforme nos alejamos de los electrodos, provocando que las partículas se desplacen lo más cercano posible al plano de los electrodos. Esto podía observarse fácilmente con el microscopio de fluorescencia pues las partículas que se encontraban fuera del plano focal (el de los electrodos) eran rápidamente atraídas hacia los electrodos y por ende quedaban enfocadas.

En la Figura 4.7 se muestra el gradiente del cuadrado de una sección del campo eléctrico de la Figura 4.5. Estos datos son importantes ya que a partir de ellos es posible calcular la fuerza ejercida sobre la partícula. Dicha fuerza desplaza a la partícula hacia los mínimos o máximos de potencial, dependiendo si es +DEP o -DEP. Considerando que la permitividad relativa y conductividad de las partículas utilizadas y del agua

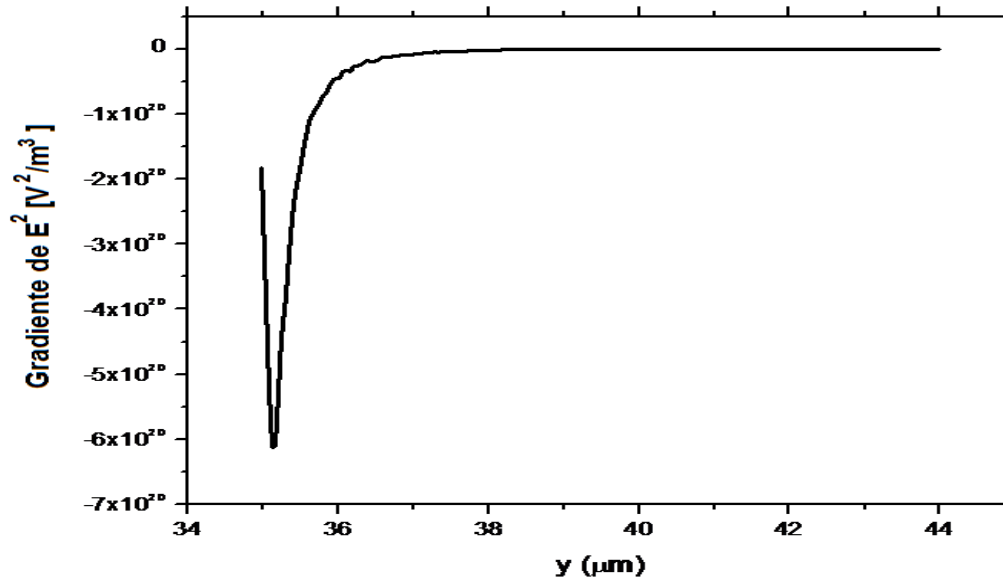


Figura 4.7: Gráfica del gradiente del cuadrado del campo eléctrico en dirección paralela al plano de los electrodos.

son [15] $\epsilon/\epsilon_0 = 2,6$, $\sigma = 10^{-7}S/m$ y $\epsilon/\epsilon_0 = 81$, $\sigma = 5 \times 10^{-8}S/m$ respectivamente, calculamos que la fuerza sobre un mismo plano paralelo a los electrodos va desde $1,60 \times 10^{-7} N$ hasta $0 N$ aproximadamente, dependiendo de la posición donde nos encontremos.

Haciendo uso de la fluorescencia de las partículas para poder verlas sin tener a los electrodos de fondo y utilizando el software del Dr. Luis Gerardo de la Fraga obtuvimos el *tracking* o seguimiento de una partícula como lo muestran las Figuras 4.8 y 4.9.

El proceso para la obtención de las gráficas es como sigue:

1. Se adquiere el video de la partícula con la cámara del microscopio de fluorescencia.
2. En el sistema operativo *LINUX*, se descompone el video en imágenes que corresponden a cada cuadro del video con el programa Mplayer.
3. Posteriormente se le indica al programa de seguimiento que imágenes debe tomar en cuenta y el centro de la partícula en la primer imagen. La salida del programa

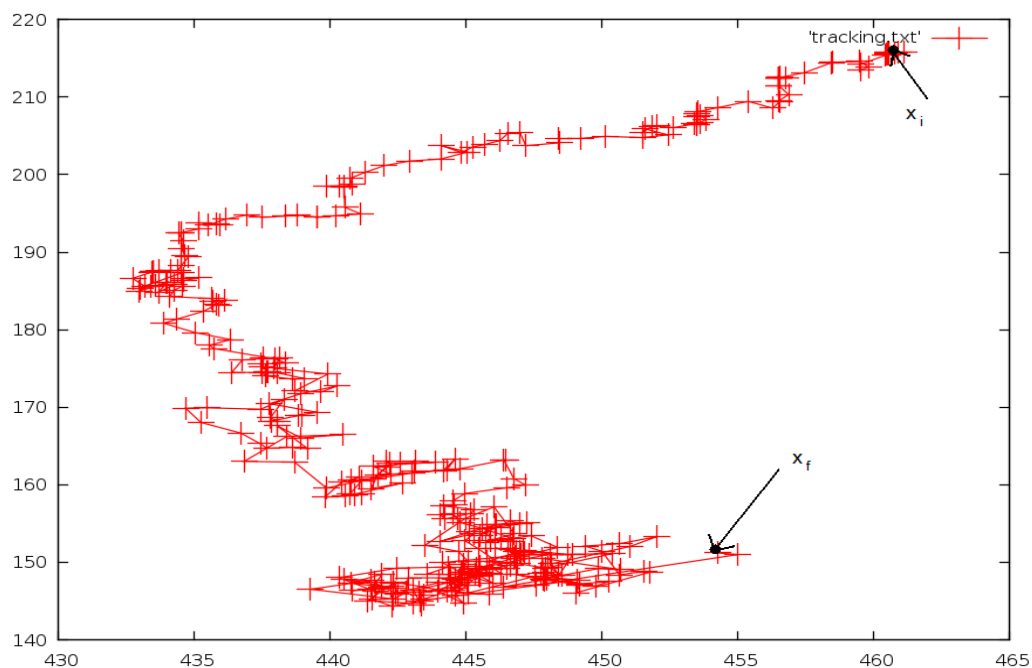


Figura 4.8: Tracking de una partícula libre [pixeles]

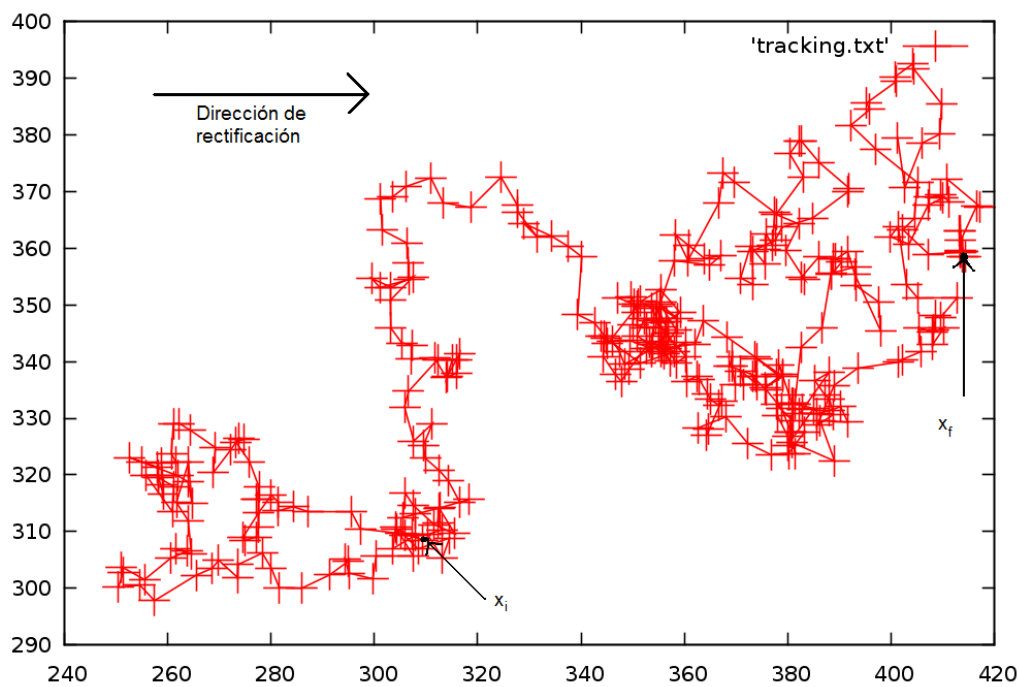


Figura 4.9: Tracking de una partícula [pixeles]

es un archivo de texto con las coordenadas en píxeles.

4. Con el programa *gnuplot* se grafican los datos y se guardan en una imagen.

En la primera gráfica no se observa un desplazamiento preferencial (eje horizontal) mientras que en la segunda si se observa un desplazamiento neto de la partícula hacia la derecha (dirección de la rectificación). Haciendo la conversión de píxeles a μm , el desplazamiento promedio para la partícula de la Figura 4.8 fue de $-3,68 \times 10^{-9}m$ en 250 segundos. Este valor es tan pequeño que se puede decir que en promedio su desplazamiento fue nulo. Para la Figura 4.9 el desplazamiento máximo de la partícula en la dirección de rectificación desde la posición de origen x_i fue de $46,8 \times 10^{-6}m$ en 187 segundos.

De los datos de la Figura 4.8 es posible calcular el desplazamiento cuadrado medio que fue de $3,06 \times 10^{-10}m$ para una observación de 250s. Usando la Ecuación 2.5 y sabiendo que $R = 8,314 J/mol \cdot K$, $\eta = 8,9 \times 10^{-4}Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, $r = 0,5 \times 10^{-6}m$, $T = 298,15K$, $\tau = 250s$ y tomando el valor del desplazamiento cuadrado medio medido, obtenemos que el número de Avogadro es $N = 4,01 \times 10^{23}mol^{-1}$. Tomando este valor para calcular el coeficiente de difusión con la Ecuación 2.3 obtenemos que $D = 7,36 \times 10^{-13}m^2/s$. A pesar de que el valor de N tiene un error relativamente grande (alrededor del 30% con respecto al valor real que es de $N = 6,02 \times 10^{23}mol^{-1}$ [6]), está dentro del mismo orden de magnitud y hay que tomar en cuenta de que este valor es sólo para una partícula por lo que el valor obtenido no es representativo de la población total. Además existen varios factores externos que alteran al sistema, provocando un mayor rango de error como el calentamiento de la muestra debido a la luz de la lámpara de fluorescencia, que provoca pequeñas corrientes debidas al gradiente de temperatura entre la región iluminada y la oscura.

La velocidad promedio de la partícula fue de $2,74 \times 10^{-10}m \cdot s^{-1}$ para la partícula

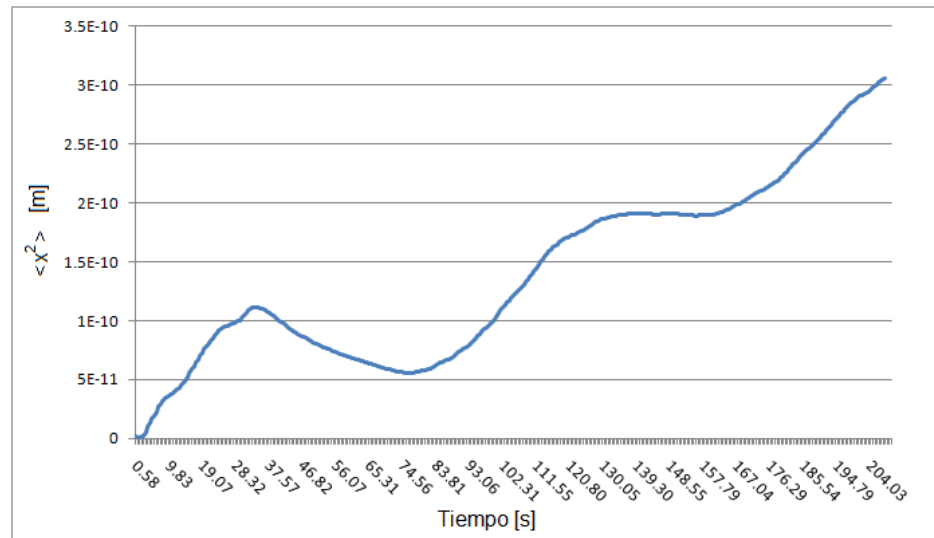


Figura 4.10: Gráfica del desplazamiento cuadrado medio de la partícula siendo rectificadora

libre y $0,14 \times 10^{-6} m \cdot s^{-1}$ para la partícula siendo rectificadora. Estos datos son muy similares a otros publicados anteriormente [1] [16] [17] en los que para el mismo tiempo t_{off} la velocidad promedio para una partícula de $0,5 \mu m$ estaba en el rango de $0,1 - 0,3 \times 10^{-6} m \cdot s^{-1}$.

Conclusiones

Hasta el momento se ha podido comprobar que con este sistema de electrodos interdigitados es factible atrapar partículas en regiones localizadas sobre un plano utilizando fuerza dielectroforética y también se demostró que el dispositivo utilizado funciona como un motor Browniano pues se pudo generar un flujo direccional de las partículas (rectificación).

Los comportamientos observados de las partículas estuvieron en acordanza con los modelos teóricos publicados (descritos en el Capítulo 2) y las mediciones fueron similares a otros trabajos publicados anteriormente.

Con ésto se abre la posibilidad de desarrollar un dispositivo *lab-on-a-chip* capaz de separar partículas de diferentes tamaños haciendo uso de sus diferencias de constante

de difusión y usando la geometría de electrodos empleada en este trabajo. Este tipo de dispositivo podría incorporarse a otros aparatos como por ejemplo un microscopio y así tener en un sólo instrumento un separador de partículas y una herramienta de análisis, reduciendo el espacio necesario, tiempos de procesado y costos para los laboratorios.

El futuro de esta investigación será mejorar el funcionamiento del dispositivo haciendo unos cambios en la geometría de los electrodos. Uno de estos posibles cambios es alongar los electrodos para disminuir los efectos no deseados de las puntas en las regiones de atrapamiento. Otra opción es, de ser posible, disminuir el ancho de los electrodos para producir mayores gradientes de campo eléctrico y tener potenciales mejor definidos.