

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN TUBO DE TIEMPO DE VUELO -TOF-  
PARA EL ESTUDIO DE LA MULTIFOTOIONIZACIÓN MOLECULAR**

**BEATRIZ EUGENIA SANABRIA ARENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN TUBO DE TIEMPO DE VUELO -TOF-  
PARA EL ESTUDIO DE LA MULTIFOTOIONIZACIÓN MOLECULAR**

**BEATRIZ EUGENIA SANABRIA ARENAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Químico**

**DIRECTOR  
ENRIQUE MEJÍA OSPINO  
Doctor en Ciencias Químicas**

**LABORATORIO DE ESPECTROSCOPIA ATÓMICA Y MOLECULAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

A C U E R D O No. 164 DE 2003  
(Diciembre 16)

Expedido en Bucaramanga, a los dieciséis (16) días del mes de diciembre de 2003.

LA PRESIDENTA DEL CONSEJO ACADÉMICO,

LUCILA NIÑO BAUTISTA  
Vicerrectora Académica

LA SECRETARIA GENERAL, LILIA AMANDA PATIÑO DE CRUZ

*Agradezco a Dios  
por haberme dado la oportunidad de terminar mis estudios ,  
a mi papá que siempre me apoyo y me animó para seguir adelante,  
a mi mamá que siempre me protege de todos los peligros que nos rodean,  
y siempre me escucha cuando nadie más lo hace,  
a mi familia que de una u otra forma colaboraron a lo largo de mi carrera,  
al profesor Enrique Mejía Ospino por sus enseñanzas y dedicación,  
a los profesores Orlando Aya Ramírez y Rafael Cabanzo Hernández  
que me dieron la oportunidad de trabajar en su laboratorio  
y desarrollar mi proyecto,  
a Javier Mejía mi compañero de proyecto,  
quien trabajo muy duro para que saliéramos adelante,  
a adris que lleva mucho tiempo siendo mi amiga,  
y siempre sabe aconsejarme,  
a Carlos Ignacio que es como mi angelito de la guarda vivo,  
a todos muchas gracias por formar parte de mi vida,  
y ayudarme a cumplir con otro capitulo,  
que escribo día a día.*

*Para Esperanza:  
Si quieres un lugar en el sol,  
Tienes que aguantar unas cuantas ampollas*  
Abigail Van Buren

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. MARCO TEÓRICO .....	2
1.1. ESPECTROMETRÍA DE MASAS POR TIEMPO DE VUELO.....	2
1.2. COMPONENTES DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.....	3
1.2.1 Dispositivo de introducción de la muestra.....	3
1.2.2 Fuente de ionización.....	4
1.2.3 Sistema de vacío .....	4
1.2.4 Analizador de tiempo de vuelo.....	5
1.2.5 Sistema de detección.....	9
1.3 RESOLUCIÓN .....	10
2. ESTADO DEL ARTE.....	12
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MODELAMIENTO .....	13
3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUBO DE TIEMPO DE VUELO .....	13
3.2 SIMULACIONES.....	20
3.2.1 Simulación de un sistema ideal.....	20
3.2.2 Optimización de las condiciones de operación del sistema .....	21
3.2.3 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución espacial inicial.....	22
3.2.3.1 Volumen de ionización grande.....	22
3.2.3.2 Volumen de ionización pequeño.....	22
3.2.4 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución de energía cinética inicial.....	23
3.2.5 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución inicial espacial y de energía cinética.....	24
3.3 ESPECTRO SIMULADO.....	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	26
4.1 VALORES ÓPTIMOS DE POTENCIAL .....	26
4.2 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DE LOS IONES POR UNA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL.....	27
4.2.1 Volumen grande de ionización.....	27
4.2.2 Volumen pequeño de ionización.....	28

---

4.3 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DE LOS IONES POR UNA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA INICIAL.....	30
4.3.1 Variación en los tiempos de vuelo de los iones a 298K.....	30
4.3.2 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DE LOS IONES A 4 K.....	31
4.4 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DEBIDO A UNA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL Y A UNA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA INICIAL EN LOS IONES A 298 K.....	32
5. CONCLUSIONES .....	36
6. RECOMENDACIONES.....	37
7. BIBLIOGRAFÍA .....	38
8. ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Masa de los iones de estudio.....	19
<b>Tabla 2.</b> Valores de tiempo de vuelo y velocidad para los iones de estudio a la mejor resolución del equipo obtenida por las simulaciones.....	27
<b>Tabla 3.</b> Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial, en un volumen grande de ionización.....	28
<b>Tabla 4.</b> Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial, en un volumen pequeño de ionización.....	29
<b>Tabla 5.</b> Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución de energía cinética inicial a 298 K.....	30
<b>Tabla 6.</b> Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución de energía cinética inicial a 4 K.....	31
<b>Tabla 7.</b> Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial y una distribución de energía cinética inicial a 298 K.....	32

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de los principales componentes de todos los espectrómetros de masas modernos típicos.....	2
<b>Figura 2.</b> Separación de los iones en un tubo de vuelo de acuerdo a su relación $m/z$ .....	6
<b>Figura 3.</b> Regiones de un tubo de tiempo de vuelo lineal con una sola etapa de aceleración.....	8
<b>Figura 4.</b> Diagrama de espaciamento entre los picos resueltos (Da) en relación al poder de resolución instrumental.....	11
<b>Figura 5.</b> Arriba. Superficie de potencial del tubo de tiempo de vuelo (placa 1 = 5000 V, placa 2 = 4600 V). Abajo. Superficie de potencial ampliada entre las placas 1 y 2.....	14
<b>Figura 6.</b> Tubo de tiempo de vuelo en 3D construido utilizando en SIMION 3D VERSION 7.00 ®.....	15
<b>Figura 7.</b> Selección de las dimensiones del arreglo de potencial.....	16
<b>Figura 8.</b> Diseño del sistema de estudio en el arreglo de potencial.....	17
<b>Figura 9.</b> Ventana donde se guarda el instrumento creado en el arreglo de potencial como una extensión .PA#.....	17
<b>Figura 10.</b> Ventana de refinamiento de la selección de potencial.....	18
<b>Figura 11.</b> Vista XY del instrumento.....	19
<b>Figura 12.</b> Ventana donde se cambian los valores de potencial de las placas 1 y 2.....	20
<b>Figura 13.</b> Menú de los parámetros variables pertenecientes a los iones de estudio.....	21
<b>Figura 14.</b> Función de distribución de $V_x$ para el ion $O_2^+$ a 298 K y 4 K respectivamente.....	24
<b>Figura 15.</b> Masa de Iones (uma) Vs tiempo de vuelo ( $\mu sec$ ) de la mejor resolución para el equipo obtenida por las simulaciones.....	26
<b>Figura 16.</b> Espectro simulado.....	33

<b>Figura 17.</b> Primera sección ampliada del espectro simulado.....	33
<b>Figura 18.</b> Segunda sección ampliada del espectro simulado.....	34
<b>Figura 19.</b> Tercera sección ampliada del espectro simulado.....	34
<b>Figura 20.</b> Cuarta sección ampliada del espectro simulado.....	34
<b>Figura 21.</b> Quinta sección ampliada del espectro simulado.....	35
<b>Figura 22.</b> Sexta sección ampliada del espectro simulado.....	35

## LISTA DE ANEXOS

**Anexo A.** Cantidades y unidades importantes en la derivación de las ecuaciones del analizador de tiempo de vuelo.

**Anexo B.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio, a diferentes valores de potencial.

**Anexo C.** Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann para los iones de estudio a 298 K.

**Anexo D.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de 500,700 y 900 uma, a diferentes valores de potencial.

**Anexo E.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio, con una distribución espacial inicial para un volumen grande de ionización.

**Anexo F.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución espacial inicial para un volumen pequeño de ionización.

**Anexo G.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 298 K.

**Anexo H.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 4 K.

**Anexo I.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 298 K y una distribución en la posición inicial para un volumen pequeño de ionización.

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN TUBO DE TIEMPO DE VUELO –TOF- PARA EL ESTUDIO DE LA MULTIFOTOIONIZACIÓN MOLECULAR.\*

**AUTOR:** SANABRIA ARENAS, Beatriz Eugenia\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Espectrometría de masas, Tubo de Tiempo de Vuelo, Ionización Multifotónica, SIMION 3D, resolución.

## CONTENIDO

La espectrometría de masas por Tubo de Tiempo de Vuelo (MS-TOF) es una técnica analítica que permite la determinación directa de las masas de especies bajo estudio, en la cual los iones son acelerados mediante un campo eléctrico a través de una región de vuelo libre, donde son separados con base a su relación  $m/z$ , donde  $m$ = masa del ion y  $z$ = carga del ion; además hace posible el estudio de procesos complejos como la Ionización Multifotónica.

Para el diseño y la construcción de un tubo de tiempo de vuelo, es necesario conocer como es el comportamiento de los iones bajo la acción de un campo eléctrico en condiciones de alto vacío. Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó el programa computacional SIMION 3D versión 7.00, y de esta manera simular el comportamiento de los iones de estudio dentro del tubo de tiempo de vuelo, bajo diferentes condiciones iniciales, con el fin de obtener los valores óptimos de potencial permitiendo la mejor resolución del equipo; además se observó la variación de la resolución con respecto a las diferentes condiciones iniciales de los iones.

La resolución de un tubo de tiempo de vuelo es afectada por varios factores, pero principalmente por una distribución de energía cinética inicial en los iones, la cual se relaciona con el sistema de introducción de la muestra, y por una distribución en la posición inicial de los iones, que depende del volumen de ionización de la muestra. Es posible realizar correcciones y predicciones para un instrumento de uso científico, sin tenerlo construido, mediante el uso de herramientas de simulación permitiendo el ahorro de tiempo y costos.

---

\* Proyecto de Investigación

\*\* Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director Enrique Mejía Ospino

## ABSTRACT

**TITLE:** Design and optimization of a Time of flight –TOF- for study the Molecular Multiphotonization \*

**AUTHOR:** SANABRIA ARENAS, Beatriz Eugenia\*\*

**KEYWORDS:** Espectrometría de masas, Tubo de Tiempo de Vuelo, Ionización Multifotónica, SIMION 3D, resolución.

## CONTENT

The time-of-flight mass-spectrometer (TOF-MS) is an analytical technique used to determine directly the mass of the species under study, in this instrument the ions are accelerated by an electrostatic field through a free flying region, the ions are separate with basis of its relation  $m/z$ , in wich  $m$ : mass of ion and  $z$ : charge of ion; furthermore it makes possible to study complex processes like Multifotonic Ionization.

For the design and construction of a Time-of-Flight it's necessary to understand how ions behave in electrostatic field in vacuum conditions. For the development of this research it was used a computational program Simion 3D version 7.00, and thus simulate the behavior of ions in the Time of Flight under different initial conditions in order to obtain the optimal values of potential allowing the instrument's best resolution, in addition to this it was observed variation of resolution with respect to the diferent initial conditions of ions.

The resolution of a Time of Flight is affected by several factors, mainly by a distribution of initial kinetic energy ions, which is related to the introduction of the sample, and a distribution in the initial position ions, which depends on the volume ionization of the sample. You can make corrections and predictions of a scientific instrument by using simulation instead of building it, and its use saves time and money.

---

\* Investigation Proyect

\*\* Faculty of Sciences. School of Chemistry. Director Enrique Mejía Ospino

## INTRODUCCIÓN

Un nuevo conjunto de áreas de investigación ha sido originado gracias al estudio de la interacción de la radiación electromagnética proveniente de un láser de intensidades medias y altas con sistemas atómicos y moleculares. Los estudios experimentales de dichos procesos han sido posibles gracias al desarrollo relativamente reciente de fuentes láser, que permiten la variación de la longitud de onda con gran precisión en amplios intervalos del espectro electromagnético y la obtención de haces de gran intensidad.

Utilizando dichas fuentes de radiación se ha podido observar una gran variedad de efectos y fenómenos en sistemas atómicos y moleculares, que no habían sido observados experimentalmente como la fluorescencia inducida, la ionización por tunelaje, la generación de armónicos, y los procesos de absorción, ionización y disociación multifotónica.

El concepto de ionización multifotónica se aplica a cualquier proceso en el que varios fotones son absorbidos por el sistema hasta llevarlo a un estado por encima de su primer potencial de ionización, con la consecuente formación del ion; una de sus mayores ventajas comparada con técnicas no ionizantes, como la fluorescencia inducida por láser, es la habilidad para determinar directamente la masa de las especies bajo investigación.

Una de las aplicaciones más importantes del láser en los últimos 20 años es su utilización en la espectrometría de masas, reemplazando a las fuentes convencionales de ionización de especies en fase gaseosa. El láser se introdujo para incrementar la eficiencia del proceso de ionización y de esta forma mejorar la sensibilidad de las técnicas analíticas que lo emplean.

Para el diseño de un instrumento científico, que opera bajo condiciones de vacío, en este caso particular el tubo de tiempo de vuelo, es esencial entender como es el comportamiento de los iones bajo la acción de un campo eléctrico. Gracias al desarrollo de programas de simulación empleados en computadores personales como el programa SIMION 3D<sup>®</sup>, es posible simular la trayectoria de los iones en un amplio rango de ordenamientos entre los campos eléctricos y/o magnéticos en condiciones de vacío. Particularmente SIMION 3D<sup>®</sup> ha contribuido significativamente en la espectrometría de masas, ya que permite diseñar y optimizar antes de la fabricación no solo componentes individuales sino también instrumentos completos. [1]

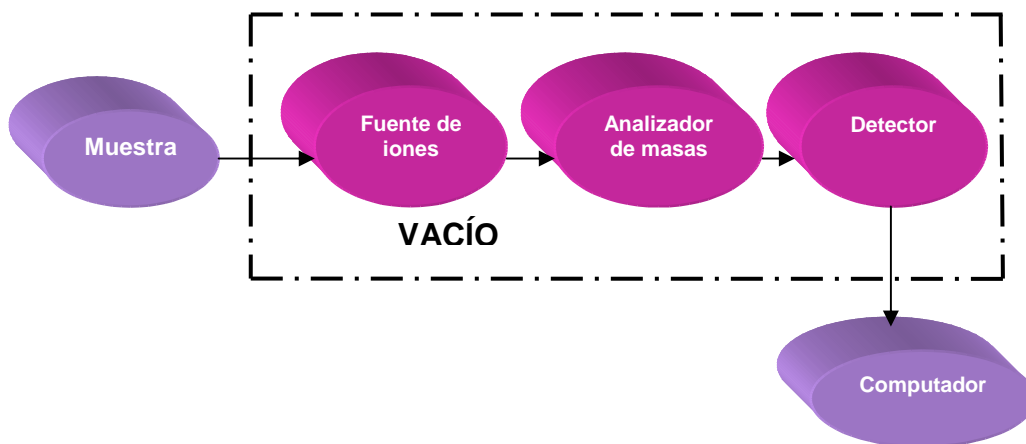
El propósito de este trabajo es diseñar un tubo de tiempo de vuelo (construido simultáneamente en el Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular LEAM) y obtener los voltajes de operación óptimos que permitan alcanzar una alta resolución del equipo y su posterior calibración, haciendo uso del programa SIMION 3D<sup>®</sup>.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. ESPECTROMETRÍA DE MASAS POR TIEMPO DE VUELO

El primer instrumento similar a un espectrómetro de masas fue descrito en 1.899 por J.J. Thomson [2-4], pero solo hasta 1.918 fue construido por Dempster [3], éste instrumento utilizaba campos magnéticos y eléctricos para separar los iones de acuerdo con su relación  $m/z$ .

Actualmente los espectrómetros de masas contienen, como mínimo: fuente de iones, analizador capaz de separar los iones con base en su relación  $m/z$ , y un medio para detectar los iones (figura 1). El análisis, la detección y algunas veces la formación de los iones ocurren bajo condiciones de vacío, aunque esto no es del todo indispensable, ya que los principios usados para separar los iones requieren ausencia de colisiones con las moléculas del gas residual. Usualmente los espectros son adquiridos y analizados con un computador; el primer espectro fue reportado en los años 60's [6].



**Figura 1.** Diagrama de los principales componentes de todos los espectrómetros de masas modernos típicos.

Gracias al desarrollo de nuevos métodos de ionización de la materia, existe un creciente interés en la espectrometría de masas, por permitir la caracterización de un amplio rango de compuestos de alto peso molecular, además permite el estudio de la ionización multifotónica; este proceso complejo es descrito por la mecánica cuántica y solo se sabe que ocurre por la absorción múltiple de fotones, pero aún se desconocen sus etapas fundamentales: la etapa en la cual ocurre la ionización o la etapa donde se produce la fragmentación.

El poco desarrollo inicial de la espectrometría de masas tipo tubo de tiempo de vuelo (TOF-MS, por sus siglas en Inglés) se debió a la falta de tecnología para registrar y procesar los espectros de masas en cortos periodos de tiempo, pero gracias al desarrollo tecnológico de los últimos años esto ya no es un problema y, junto con los nuevos métodos de ionización y técnicas rápidas de separación de mezclas complejas, TOF-MS es hoy en día un poderoso sistema analizador de masas.

## 1.2. COMPONENTES DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Básicamente, el sistema está constituido por: un dispositivo de introducción de la muestra, una fuente de ionización, el dispositivo de vacío, un analizador tipo tubo de tiempo de vuelo y el sistema de detección.

### 1.2.1 Dispositivo de introducción de la muestra

La finalidad de éste dispositivo es permitir la entrada de la muestra en la fuente de iones con la mínima pérdida de vacío. Existen principalmente dos formas de introducción de la muestra:

- Por sonda directa: se usa para líquidos y sólidos no volátiles, estos pueden introducirse en la región de ionización mediante un soporte de muestra o sonda, el cual se inserta a través de una cámara intermedia de vacío, dicha cámara está diseñada para limitar el volumen de aire que puede entrar en la región de ionización durante la inserción de la sonda; las sondas se utilizan también cuando la cantidad de muestra es limitada.
- Sistemas discretos de entrada: es el sistema habitual para muestras gaseosas y líquidos volátiles, la muestra es volatilizada en una zona previa a la región de ionización, donde se le aplica una determinada temperatura (la cual depende de la temperatura de ebullición del analito), luego es introducida a la región de ionización mediante un sistema de vacío.

En este sistema, la entrada de la muestra puede ser:

- Por efusión: el gas escapa del recipiente que lo contiene por un pequeño orificio de diámetro  $D$ , de tal forma que el gas permanezca en equilibrio a temperatura ambiente ( $\approx 298\text{K}$ ). Para que ocurra la efusión se debe garantizar que:

$$t^* \ll t_c \Rightarrow D \ll l \quad (1)$$

$$t^* \approx \frac{D}{v}$$

siendo  $t_c = \frac{l}{v}$

$$l \approx \frac{1}{n\pi d^2}$$

donde:  $t^*$  tiempo que la molécula está cerca al agujero,

$t_c$  tiempo medio entre choques,

$\bar{v}$  velocidad media de la molécula,

$l$  recorrido medio de una molécula del gas<sup>1</sup>.

- Por haz molecular: la muestra se introduce a una temperatura  $\approx 4$  K garantizando que todas las moléculas se encuentren en un mismo estado cuántico definido (usualmente el estado de más baja energía), viajando en un espacio libre con una distribución de velocidades estrecha y una densidad suficientemente baja de tal forma que las interacciones intermoleculares sean despreciables.

Las condiciones anteriores son las más favorables cuando se quiere estudiar el proceso de ionización multifotónica.

### 1.2.2 Fuente de Ionización

En los instrumentos de tiempo de vuelo (TOF) los iones positivos son producidos periódicamente por bombardeo de la muestra con pulsos de electrones, iones secundarios o fotones generados por láser. Estos pulsos tienen normalmente una frecuencia de 10 Hz a 50 KHz y un tiempo de vida  $< 0,25 \mu\text{s}$ .

En un láser pulsado, como su palabra lo indica, la energía es liberada en forma de pulsos, ya que posee una alta intensidad, lo cual permite una ionización multifotónica de la muestra; los valores típicos de energía de ionización, para moléculas pequeñas, son alrededor de 10 a 15 eV, los cuales corresponden a la absorción de 3 fotones en el U.V, haciendo que el uso del láser pulsado sea habitual en la espectroscopía de investigación multifotónica.

### 1.2.3 Sistema de vacío

El tubo de tiempo de vuelo requiere que el sistema completo se encuentre en condiciones de vacío, para garantizar que el camino libre medio de los iones

<sup>1</sup> Tomado de la Presentación de Prof. ENRIQUE MEJÍA OSPINO. Capítulo II. Interacción térmica y la distribución canónica según la aproximación clásica. Universidad Industrial de Santander

sea mayor a la longitud del contenedor; la distancia promedio de una molécula que viaja entre colisiones para condiciones típicas en espectrometría de masas, puede ser estimada como:

$$L = \frac{4,95}{P} \quad (2)$$

Donde  $L$ : distancia promedio recorrida de una molécula (cm)  
 $P$ : Presión (mTorr).

De acuerdo con la ecuación 2, se puede deducir que a presiones del orden de  $10^{-5}$  Torr, las partículas se mueven a través de un metro de longitud sin colisiones.

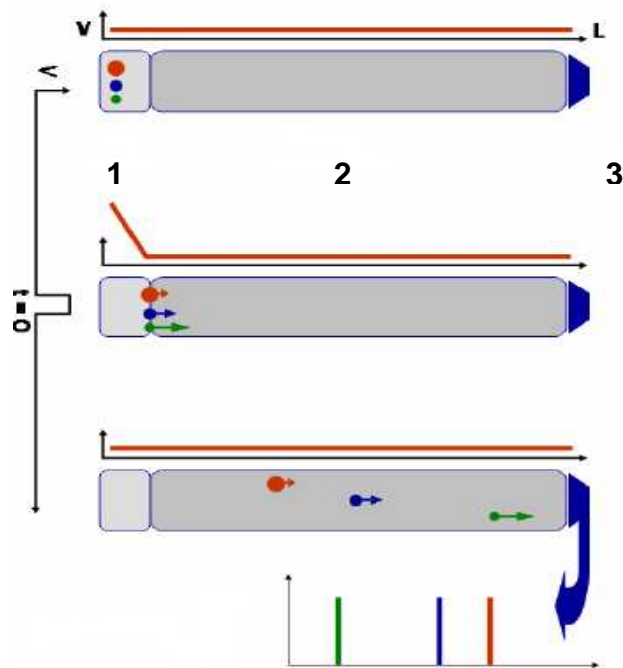
Los principales tipos de bombas que se utilizan para conseguir el alto vacío, en espectrometría de masas, son las difusoras y las turbomoleculares, sin olvidar las mecánicas o rotatorias que son las que se necesitan para hacer los vacíos preliminares, que requieren las difusoras y las turbomoleculares para empezar a trabajar.

#### 1.2.4 Analizador de tiempo de vuelo.

Los primeros espectrómetros de masas requerían el uso de los dos campos: eléctrico y magnético. Sin embargo en 1946 Stephens sugirió que un espectrómetro de masas podía ser hecho de tal forma que solo utilizara el campo eléctrico y ser capaz de separar paquetes de iones, con base en que el tiempo de vuelo de un ion en un tubo al vacío es proporcional a la relación  $m/z$  del ion, donde  $m$  es el número masa y  $z$  es el número carga [7] (figura 2); este tipo de instrumento recibió el nombre de espectrómetro de masas por tiempo de vuelo (TOF, por sus siglas en Inglés), y fue construido por primera vez en 1948 por Cameron y Eggers, éste instrumento utilizó impacto de electrones (EI) como fuente para generar los iones [8].

Esencialmente, en TOF-MS una población de iones que se mueven en la misma dirección y con la misma distribución de masas, a una energía cinética aproximadamente constante, tiene una correspondiente distribución de velocidades. Si los iones están bajo la influencia de un campo eléctrico externo, son acelerados en un plano espacial normal al vector de aceleración, donde su tiempo de llegada a un plano “blanco” (paralelo al plano de origen) será distribuido de acuerdo a la  $(m/q)^{1/2}$  de los iones, permitiendo su separación.

Para velocidades subrelativistas (régimen de energías de los KeV), una buena descripción del TOF-MS se lleva a cabo con física newtoniana, mediante el empleo de las siguientes ecuaciones [9-11]:



1. FUENTE DE IONES
2. REGIÓN LIBRE DE VUELO
3. DETECTOR

## TOF

**FIGURA 2.** Separación de los iones en un tubo de vuelo de acuerdo con su relación  $m/z$ .

Para una partícula  $q$  de masa  $m$  en un campo eléctrico constante  $E$  (con las cantidades fundamentales en el sistema SI -Anexo A-) la fuerza y la aceleración de la partícula están dadas por:

$$F = Eq \quad (3)$$

$$F = ma \quad (4)$$

Donde  $f$  = fuerza de la partícula,  $E$  = campo eléctrico aplicado,  $q$  = carga de la partícula,  $m$  = masa de la partícula y  $a$  = aceleración de la partícula. Luego

$$a = \frac{Eq}{m} \quad (5)$$

La velocidad y el tiempo de la partícula están dadas por:

$$a = \frac{du}{dt} \quad (6)$$

$$u = \int \frac{Eq}{m} dt \quad (7)$$

$$u = u_0 + \left(\frac{Eq}{m}\right)t \quad (8)$$

$$t_a = \frac{u - u_0}{E} \left(\frac{m}{q}\right) \quad (9)$$

donde  $u$  = velocidad de la partícula,  $u_0$  = velocidad inicial de la partícula,  $t$  = tiempo de vuelo y  $t_a$  = tiempo en el que el ion es acelerado desde  $u_0$  hasta  $u$ .

La posición de la partícula está dada por:

$$s = \int u dt \quad (10)$$

$$s = s_0 + u_0 t + \frac{1}{2} \left(\frac{Eq}{m}\right)t^2 \quad (11)$$

donde  $s$  = distancia y  $s_0$  = posición inicial del ion.

$$qV = qEs_a \quad (12)$$

$$qEs_a = \frac{1}{2} mu_D^2 \quad (13)$$

$$u_D = \sqrt{\frac{2qEs_a}{m}} \quad (14)$$

donde  $V$  = voltaje de aceleración,  $s_a$  = Distancia en  $E$  del promedio  $S_0$  a la región libre, y  $u_D$  = velocidad de separación.

El tiempo de separación de la partícula está dado por:

$$t_D = \frac{D}{u} \quad (15)$$

$$t_D = \frac{D}{\sqrt{\frac{2qEs_a}{m}}} \quad (16)$$

$$t_D = \frac{D}{\sqrt{\frac{2qV}{m}}} \quad (17)$$

donde  $t_D$  = tiempo en el que el ion viaja a velocidad constante.

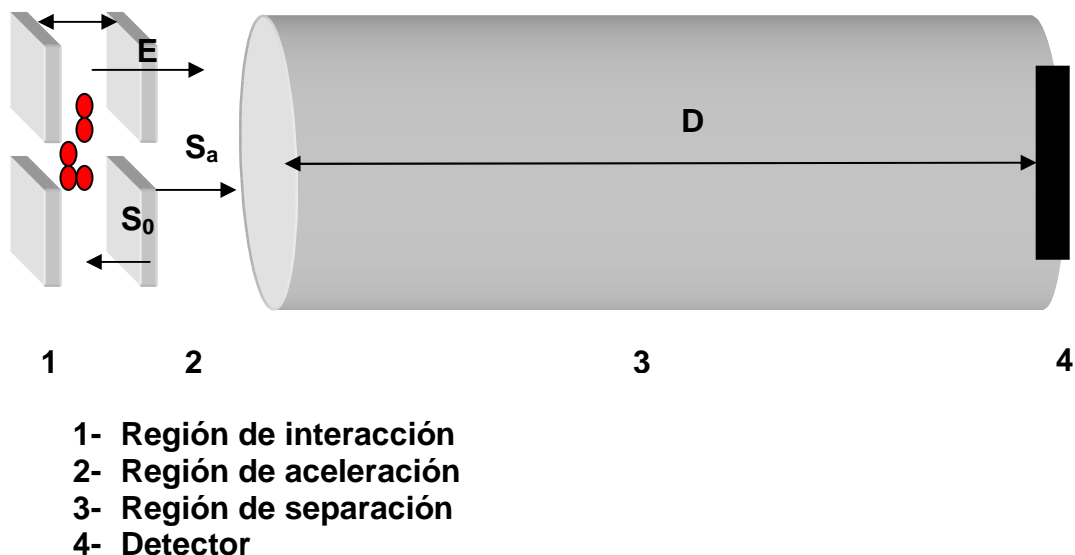
El tiempo de vuelo observado es:

$$TOF = t_0 + t_a + t_D + t_d \quad (18)$$

donde  $t_0$  = tiempo inicial donde el ion comienza a ser acelerado,  $t_a$  = tiempo en el que el ion es acelerado de  $u_0$  a  $u$ ,  $t_D$  = tiempo en que el ion viaja a velocidad constante y  $t_d$  = tiempo de respuesta del sistema de detección.

De acuerdo con Wiley-McLaren [12], en un tubo de tiempo de vuelo existen tres regiones (figura 3): la región de interacción o ionización, la región de aceleración y la región de vuelo libre.

En la región de interacción la muestra es inyectada en condiciones de alto vacío para ser impactada con un láser pulsado y así formar los iones positivos mediante fotones; la región de interacción es delimitada por dos placas de acero inoxidable separadas una distancia  $d_1$ , las cuales son sometidas a una diferencia de potencial para generar un campo eléctrico (idealmente constante), que separa los electrones de los cationes en sentidos opuestos; los cationes pasan a la región de aceleración que se encuentra en medio de la segunda y la tercera placa (de acero inoxidable y conectada a tierra), separadas una distancia  $d_2$ .



**Figura 3.** Regiones de un tubo de tiempo de vuelo lineal con una sola etapa de aceleración.

Una vez los cationes son acelerados pasan a la región de vuelo libre (recibe este nombre debido a que allí no actúan campos eléctricos o magnéticos que cambien la energía cinética de los iones), la cual empieza en la tercera placa y termina en el detector de partículas, donde la señal recibida es amplificada y luego registrada en un osciloscopio para finalmente ser analizada en un computador. En general el tiempo que los iones toman para separarse en la región libre de campo, es mucho mayor que el tiempo de aceleración.

Entre las ventajas más significativas de un analizador de tiempo de vuelo se encuentran:

- Un rango de masas ilimitado (teóricamente).
- La habilidad de obtener el espectro completo de un paquete de iones sencillo, contrario a los analizadores por escaneo y, por lo tanto, remover la variación en las intensidades de la señal relativa entre la relación  $m/z$ , debido a variaciones en la fuente; además se pueden adquirir espectros rápidamente, basados en el TOF del ion con el valor de relación  $m/z$  más alto (típicamente en el rango de los 10-100 $\mu$ s).
- Es un instrumento relativamente simple (en teoría), ya que solo los campos eléctricos son requeridos.

En este tipo de instrumento en general las limitaciones más significativas se relacionan con la resolución y el acoplamiento con fuentes de iones continuas.

### 1.2.5 Sistema de detección

El detector es un componente crítico en cualquier espectrómetro de masas, ya que sin un detector de iones efectivo es imposible obtener un espectro. Un buen detector debe tener:

- Rápido tiempo de respuesta
- Alta adquisición de datos
- Buena eficiencia de conversión

Generalmente está constituido por un cátodo emisor que al recibir el impulso, producido por los iones, emite electrones los cuales son acelerados hacia el dínodo, éste a su vez emite varios electrones más al recibir el impacto de cada electrón; este proceso se repite varias veces hasta obtener una cascada de electrones que llega al colector logrando una corriente fuertemente amplificada.

Idealmente el detector debe tener un tiempo de resolución mucho mejor que el analizador, ya que esto afecta la resolución final del equipo [14].

La señal recibida en general puede ser medida en:

- Cuentas por unidad de tiempo (digital)
- Voltaje por unidad de tiempo (análogo)
- Poder (en el dominio de la frecuencia)

Comercialmente existen varios tipos de detectores para espectrómetros de masas; en los primeros años predominaban los multiplicadores de electrones de detección puntual situados en el ambiente de alto vacío del espectrómetro, como los detectores "Channeltron" de bajo costo y uso general; los sistemas de conversión fotónica más sofisticados, sensibles y duraderos. Recientemente han aparecido sistemas de detección simultánea, tales como baterías de micromultiplicadores multicanal (Microchannel Plate o Multichannel Multiplier Array Detector), combinadas normalmente con posterior centelleo o conversión fotónica, sin embargo el Channeltron sigue siendo uno de los más frecuentemente utilizados.

### 1.3 RESOLUCIÓN

El poder de resolución es la habilidad del instrumento para separar iones con relación  $m/z$  similar, convencionalmente se determina por la relación  $m/\Delta m$ , donde  $\Delta m$  es la diferencia de masas discernible, aunque también se puede determinar en términos de  $t/\Delta t$  utilizando:

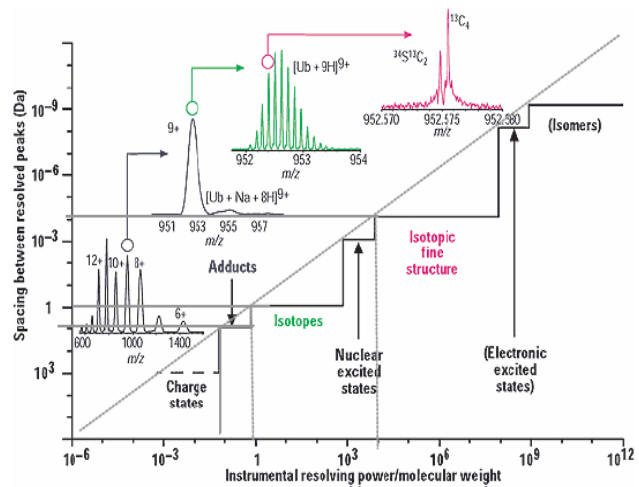
$$R = \frac{m}{\Delta m} = \frac{t}{2\Delta t} \quad (19)$$

El intervalo de tiempo finito  $\Delta t$  es generalmente la anchura del pico en la mitad de su máximo (FWHM).

El poder de resolución está limitado por las pequeñas diferencias en la medida del tiempo de vuelo para iones de la misma masa, esto se debe a la distribución en la energía cinética inicial (velocidad molecular), distribución en la posición inicial y tiempo de formación de los iones antes de la aceleración. Un campo de aceleración no ideal, la variación en el tiempo de respuesta del sistema de detección y las colisiones entre las partículas, imparten a los iones una energía adicional. El tiempo de respuesta del sistema de detección y la incertidumbre instrumental contribuyen a una dispersión temporal adicional.

De acuerdo con el tipo de ion formado por el analito, el espaciamiento entre los picos del espectro varía (figura 4) para un mismo instrumento con un poder de resolución determinado.

**Diferente carga pero igual masa**  
 Iones con valores de masa cercanos  
**Iones de igual fórmula química pero diferente composición isotópica**  
**Iones con la misma masa nominal pero diferente composición elemental**



**Figura 4.** Diagrama de espaciamento entre los picos resueltos (Da) en relación al poder de resolución instrumental. [15]

El uso de los multiplicadores de electrones como sistemas de detección, mejora la resolución del equipo al aumentar el grosor efectivo del paquete de iones que van a ser detectados; por ejemplo, el uso de un multiplicador de electrones con entrada planar y un campo magnético permite aumentar de una sola vez la resolución en 300 [10].

## 2. ESTADO DEL ARTE

Como resultado de las investigaciones, especialmente llevadas a cabo por los grupos de Bernstein [16-23], Schalag [24-29] y Zare [29-30] entre los años 70's y 80's la ionización multifotónica adquiere gran interés, utilizando la ionización multifotónica en combinación con la espectrometría de masas de tiempo de vuelo, estos grupos lograron estudiar canales de disociación de diferentes iones moleculares, así como la caracterización de estados excitados a través de procesos de ionización multifotónicos resonantes.

Por medio de experimentos se ha demostrado que en un proceso multifotónico existe una captura de varios fotones en el sistema molecular; sin embargo, aún se desconoce cuáles son las etapas fundamentales de este proceso, en cuál etapa ocurre la ionización, cuándo ocurre la fragmentación, y en que punto o puntos son absorbidos los fotones.

Debido a estos interrogantes, el LEAM (Laboratorio de Espectrometría Atómico Molecular) decidió construir un tubo de tiempo de vuelo acoplado a un láser pulsado y así poder iniciar sus estudios en este campo.

En el pasado, el desarrollo de instrumentación científica se realizaba a prueba y error, pero en los últimos años gracias al desarrollo de programas computacionales, ésta tarea es más "fácil y rápida", permitiendo realizar correcciones y predicciones del sistema previas a su construcción.

Actualmente existen en el mercado una variedad de programas computacionales creados especialmente con este fin [31-32], SIMION 3D<sup>®</sup> es el estándar industrial para la simulación en 3 dimensiones de iones presentes en una variedad de sistemas existentes en el mundo real; en general sirve para el diseño de componentes e instrumentos relacionados con la dinámica de iones<sup>2</sup>.

Gracias a este programa, se han generado métodos que permiten entender: el comportamiento de los iones en campos eléctricos y magnéticos con diferentes geometrías y combinaciones, el movimiento de los iones en el vacío y en ambientes viscosos (refracción electrostática y movimiento a través de rendijas), el movimiento de los iones en condiciones de alta y baja presión; también se ha estudiado la resolución de los equipos por variaciones en la posición del láser en los ángulos de entrada y salida, en la energía de los iones, o debido a la introducción de componentes como los lentes einzel y las trampas de iones [33-38].

---

<sup>2</sup> Tomado de <http://www.simion.com/info/Articles>

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MODELAMIENTO

El proceso de modelamiento se llevó a cabo teniendo en cuenta la información presentada en los 2 capítulos anteriores, con el fin de obtener los valores de voltaje que proporcionan un óptimo funcionamiento del instrumento; además la variación de ciertos parámetros iniciales en las simulaciones permitieron obtener un sistema aproximado a la realidad con el cual se pudo predecir y corregir el sistema construido.

#### 3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUBO DE TIEMPO DE VUELO

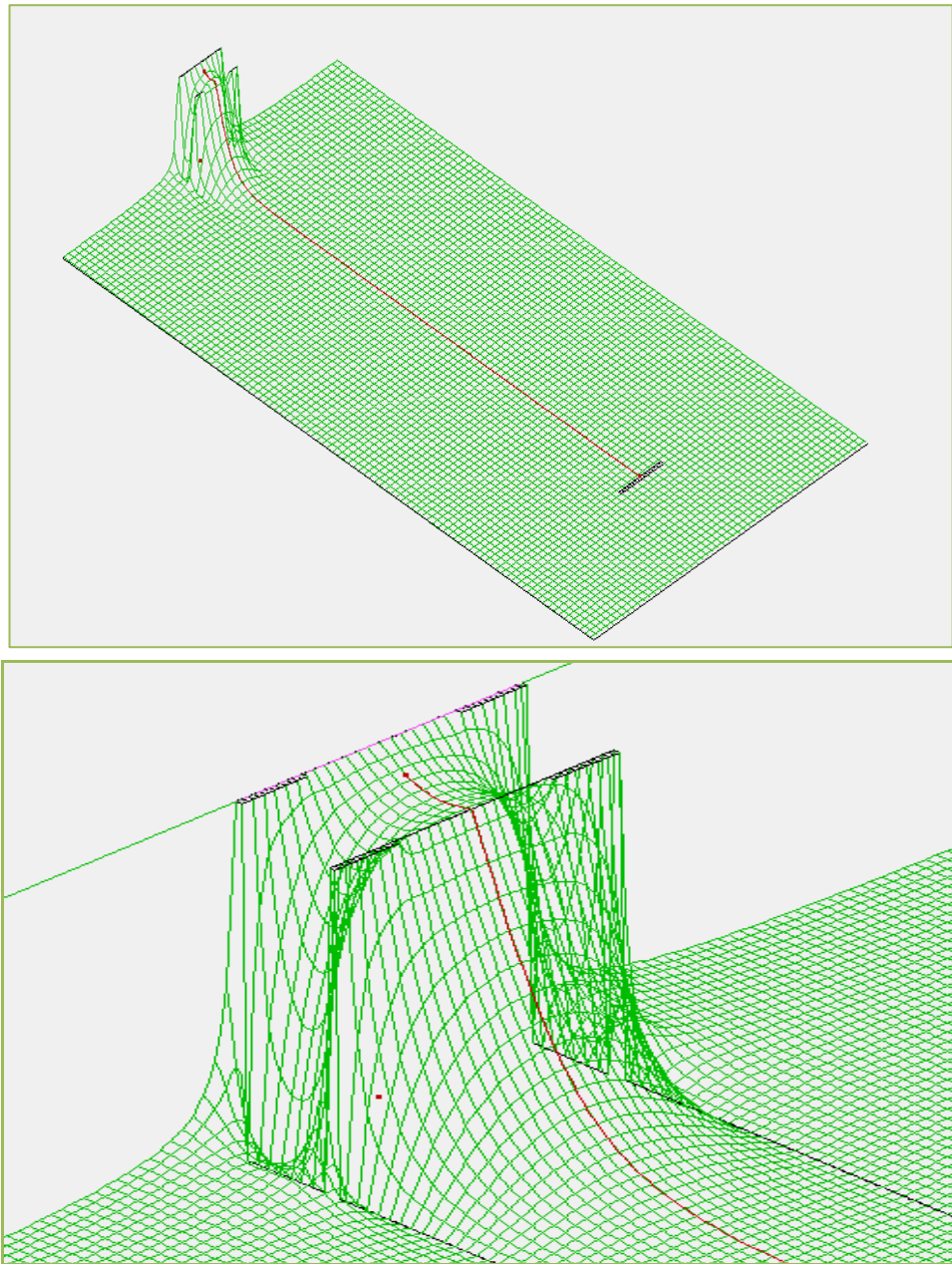
SIMION 3D VERSION 7.00 ® es el estándar industrial para la simulación en 3 dimensiones de iones, presentes en una variedad de sistemas existentes en el mundo real; entre sus características principales se encuentran: variación de los parámetros dinámicos, potenciales en función del tiempo y efectos espaciales por la carga de los iones. Además permite una visión en los planos XY, ZY y XZ, y una visión 3D de las superficies de potencial del sistema (Figura 5).

SIMION (Scientific Instrument Services, Inc.) originalmente fue creado por D.C. McGilvery en la Universidad de Latrobe Australia en 1977, pero durante los últimos 19 años ha sido mejorado por David Dahl del Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho; entre sus campos de aplicación se encuentran: DINÁMICA DE LOS IONES (espectrómetros, espectrometría de masas, óptica de iones y celdas ICR) Y DISEÑO DE COMPONENTES (dispositivos electrostáticos, fuente de iones, espectrómetro de masas y celdas ICR).<sup>3</sup>

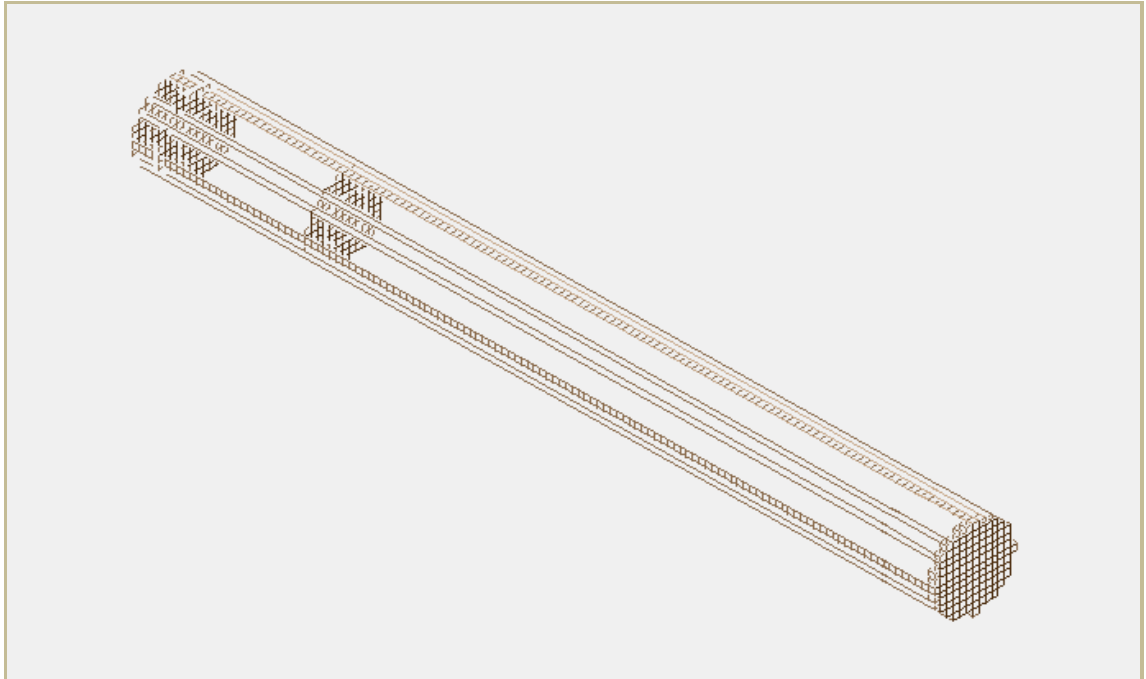
Para realizar la simulación fue necesario diseñar y construir el tubo de tiempo de vuelo en el software (Figura 6) utilizando, como parámetros físicos constantes: la longitud del tubo de tiempo de vuelo (60 cm) ubicado sobre el eje x , la distancia de separación que existe entre las placas (placa 1 y 2 =1,6 cm y placa 2 y 3 = 8 cm ) y el diámetro de la rendija central en las tres placas con 1,3 cm.

---

<sup>3</sup> Tomado de <http://www.sisweb.com/simion.htm>



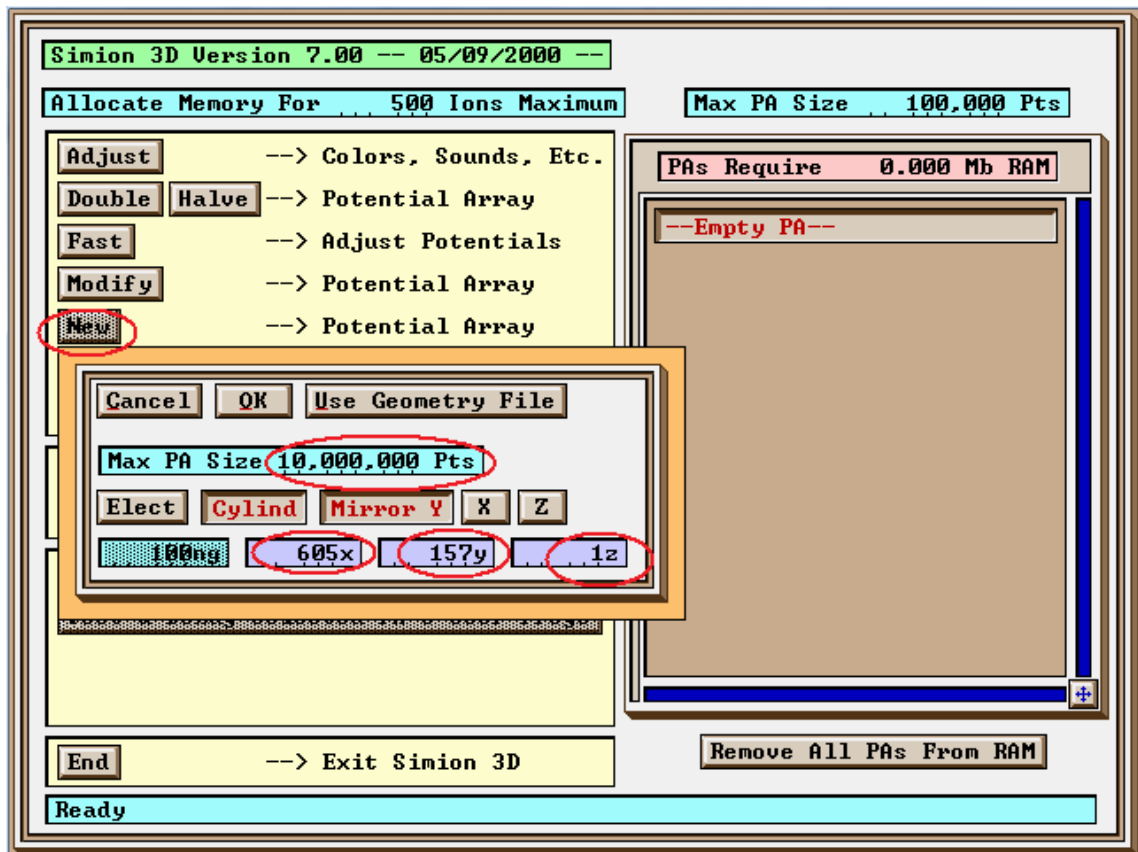
**Figura 5.** Arriba. Superficie de potencial del tubo de tiempo de vuelo (placa 1 = 5000 V, placa 2 = 4600 V). Abajo. Superficie de potencial ampliada entre las placas 1 y 2.



**Figura 6.** Tubo de tiempo de vuelo en 3D construido en SIMION 3D VERSION 7.00 ®

En SIMION 3D VERSION 7.00 ® la construcción del tubo de tiempo de vuelo se llevo a cabo de acuerdo con los siguientes pasos:

1. En la ventana del Menú se seleccionó el botón NEW para crear el arreglo de potencial, en donde se ubicaron las piezas del instrumento, se seleccionó un tamaño máximo de arreglo de potencial y se eligieron los valores de X, Y y Z, teniendo en cuenta las dimensiones reales del equipo (Figura 7). Para este trabajo, los valores utilizados fueron: 605 en X, 157 en Y y 1 en Z, con 10,000,000 Pts en el tamaño máximo del arreglo de potencial.
2. Se seleccionó el botón MODIFY para dibujar en el arreglo de potencial las piezas del instrumento (Figura 8), se asignó el valor de voltaje inicial en cada una de las placas (800 V= placa 1, 400 V= placa 2, 0 V = placa 3 ); las placas fueron representadas por  $1^{1/2}$  columna sombreada de 26 puntos de alto por 2 puntos de ancho (donde cada punto equivale a 1 mm); la mitad de columna sin sombrear (del punto 13 al punto 0) correspondió al diámetro de la rendija que va en el centro de las 3 placas; las distancias de separación entre las placas 1 y 2 fue de 16 puntos, y entre las placas 2 y 3 fue de 80 puntos; el detector se ubicó en el punto 600 hasta 605, el cual se representó por un rectángulo sombreado (dimensiones: 5 puntos de ancho X 26 puntos de alto) con 0 V de potencial; todo el sistema se unió por una línea sombreada con 0 V de potencial, que fue desde el detector hasta la placa 1 y representa el grosor de la placa que forma el tubo de tiempo de vuelo. Una vez se obtuvo el sistema de estudio, se seleccionó el botón QUIT y YES.



**Figura 7.** Ventana de las dimensiones del arreglo de potencial.

3. En la ventana del Menú se seleccionó el botón SAVE y se accedió a los archivos del disco C, en donde se guardó el instrumento creado con una extensión .PA# (Figura 9).
4. Desde la ventana del Menú se seleccionó el botón REFINE y luego REFINE POTENTIAL ARRAY (Figura 10).

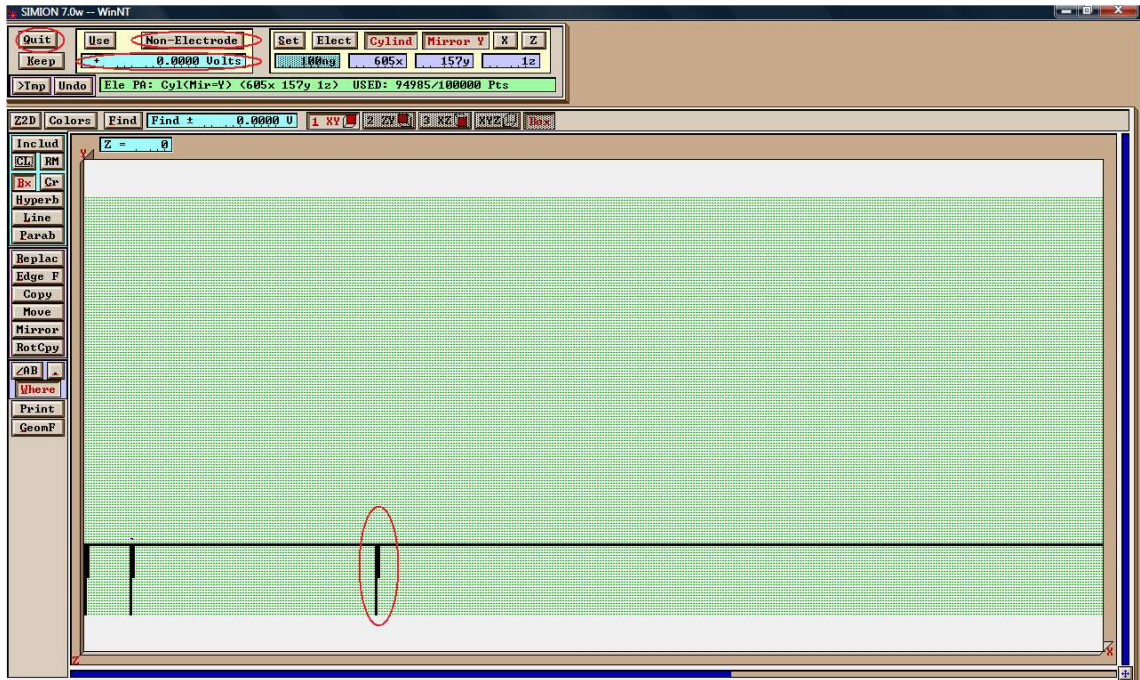


Figura 8. Diseño del sistema de estudio en el arreglo de potencial.

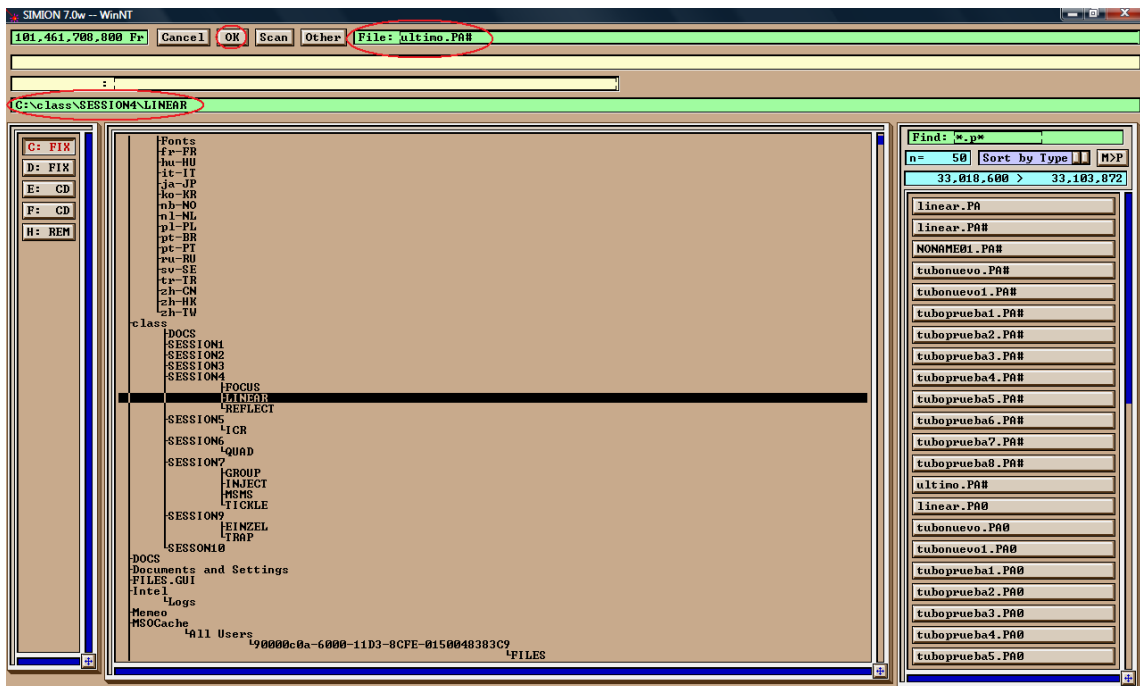
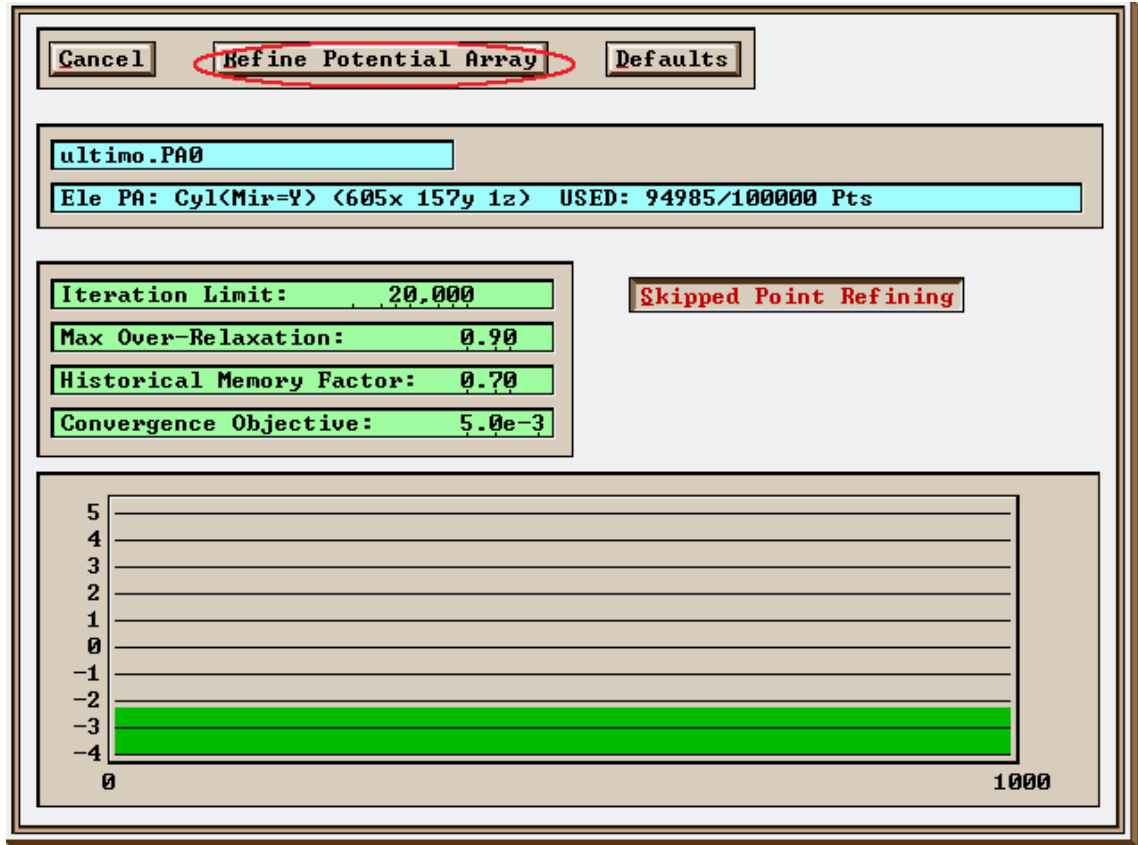


Figura 9. Ventana donde se guardó el instrumento creado en el arreglo de potencial como una extensión .PA#.



**Figura 10.** Ventana de refinamiento de la selección de potencial.

5. En la ventana del Menú, con el botón VIEW se accedió al instrumento simulado y se seleccionaron los parámetros correspondientes a los iones de estudio, a través del botón DEF, en la carpeta normal ions del menú situado en la parte superior de la pantalla (Figura 11).

Para simular el comportamiento de partículas cargadas en el tubo de tiempo de vuelo, se tomaron los iones correspondientes a las posibles sustancias provenientes de las trazas de aire que se encontrarían dentro de la cámara de ionización en el momento de la obtención de los espectros del Ar y N<sub>2</sub> (Tabla 1), estos últimos elementos fueron escogidos de acuerdo a la disponibilidad de recursos del laboratorio y a las características propias de cada sistema las cuales resultan beneficiosas para la calibración del equipo; dichas características incluyen: bajo potencial de ionización y representación de un sistema atómico y un sistema molecular simple respectivamente

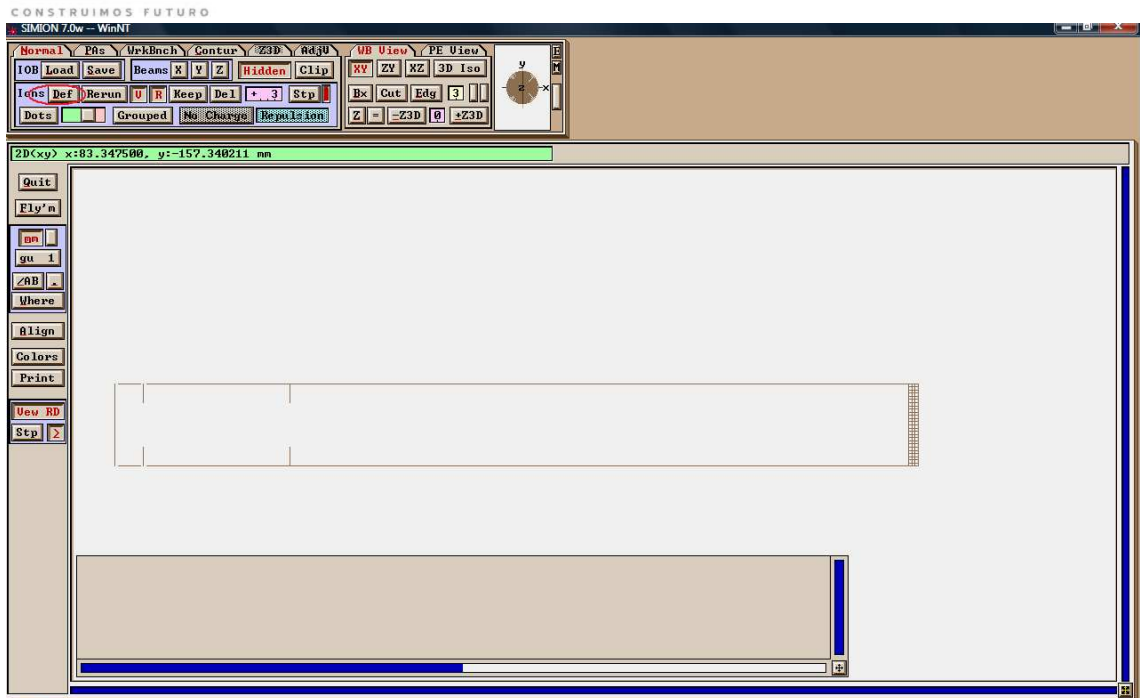
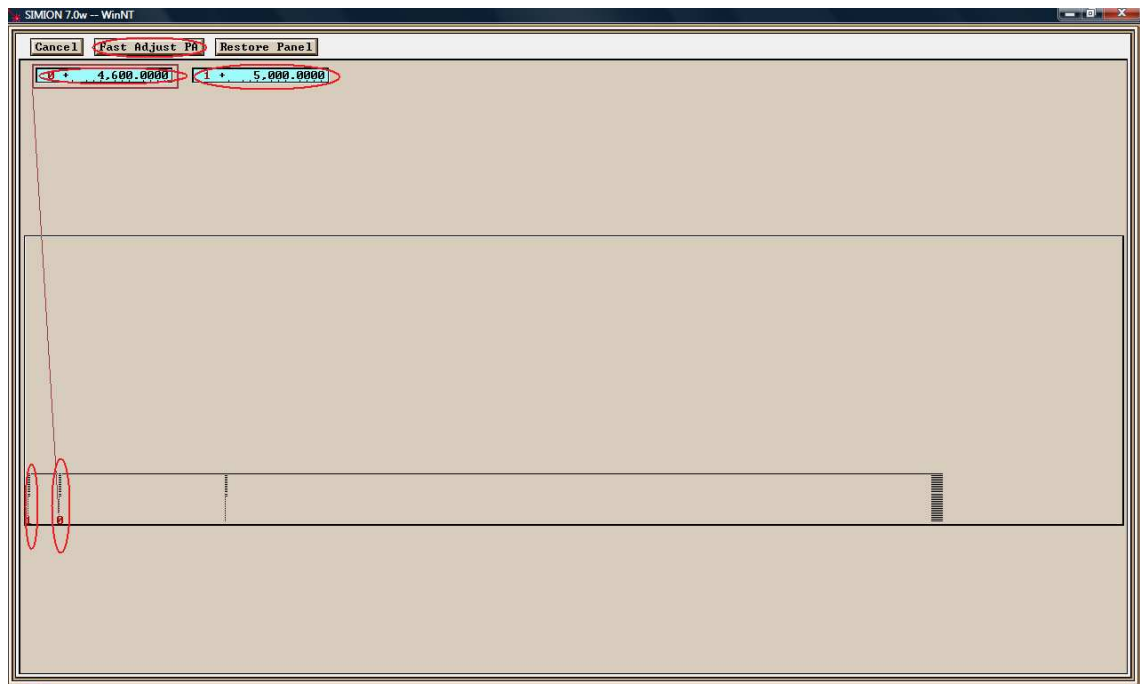


Figura 11. Imagen de la vista XY del instrumento.

ION	MASA ( UMA)
H <sup>+</sup>	1,0079
H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2,0158
N <sup>+</sup>	14,0067
O <sup>+</sup>	15,9994
OH <sup>+</sup>	17,0073
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	18,0152
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	28,0134
NO <sup>+</sup>	30,0061
O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	31,9988
Ar <sup>+</sup>	39,948

Tabla 1. Masa de los iones de estudio

Para cambiar los valores de potencial en las placas 1 y 2 se accedió por el botón Fadj de la carpeta Pas, ubicada en la parte superior de la pantalla donde se encuentra el instrumento simulado (Figura 12) y en cada ventana se escribieron los nuevos valores de potencial para las placas 1 y 2.



**Figura 12.** Ventana donde se cambiaron los valores de potencial de las placas 1 y 2.

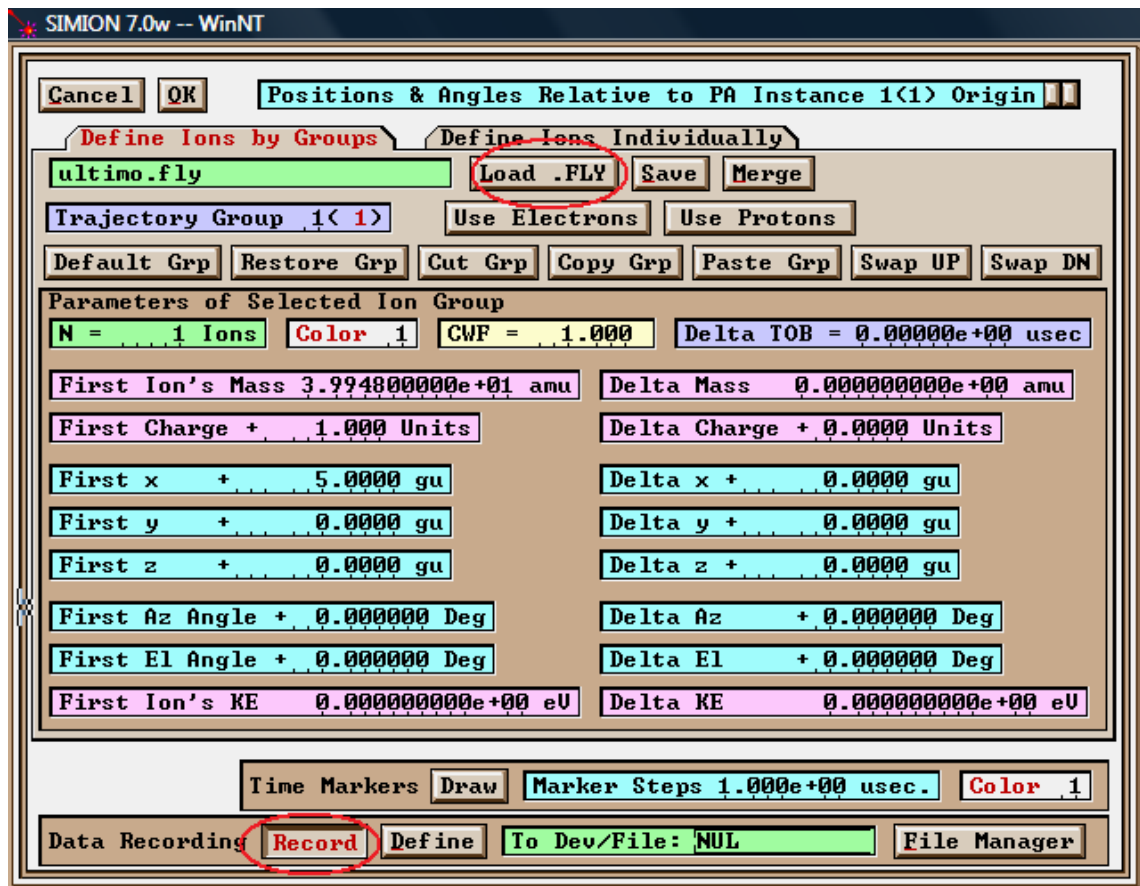
## 3.2 SIMULACIONES

Una vez se construyó el tubo de tiempo de vuelo en el programa, se procedió a especificar las características de los iones de estudio, a partir del archivo LINEAR.FLY al cual se accede por el botón LOAD.FLY (Figura 13) y se seleccionó el botón RECORD, ubicado en la parte inferior del Menú de los iones, para que los datos obtenidos fueran mostrados en la pantalla donde se encuentra el sistema simulando.

### 3.2.1 Simulación de un sistema ideal

La primera simulación se hizo con un solo ion dentro del sistema; la carga de todos los iones de diferente masa fue de +1; el vector posición inicial fue (5,0,0); los ángulos polares de movimiento: azimutal y de elevación fueron de  $0^\circ$  y todos los iones tuvieron una energía cinética inicial de 0 eV; todo esto con el fin de obtener los valores de los voltajes en las placas 1 y 2, que proveen la mejor resolución de los picos en un sistema ideal.

Los valores de voltaje fueron:  $800 \text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 5000 \text{ V}$  y  $400 \text{ V} \leq \text{placa 2} \leq 4800 \text{ V}$  con  $\Delta_{\min}=200 \text{ V}$  y  $\Delta_{\max}= 1000 \text{ V}$  entre las placas 1 y 2.



**Figura 13.** Menú de los parámetros variables pertenecientes a los iones de estudio.

Los valores de tiempo de vuelo (TOF) y las velocidades de los iones, obtenidos con la simulación para los diferentes voltajes aplicados en la placa 1 y la placa 2, se encuentran en el anexo B; adicionalmente se realizó la misma simulación para iones con masas de 500, 700 y 900 uma, respectivamente (anexo C), con el fin de comparar el comportamiento de los iones con mayores valores de masa en el equipo.

### 3.2.2 Optimización de las condiciones de operación del sistema

Teniendo en cuenta los valores de tiempo de vuelo arrojados por el simulador para un sistema ideal, se procedió a realizar un análisis de los mismos y de esta forma determinar bajo a qué diferencias de potencial se observa una mayor separación entre los tiempos de vuelo de cada uno de los iones, ya que ésta se relaciona directamente con la resolución del equipo.

Es importante aclarar que la resolución se ve afectada por una serie de factores mencionados en el capítulo 3, algunos de los cuales pueden ser

corregidos implementando ciertos dispositivos existentes en el mercado, que han sido diseñados especialmente para este fin, pero actualmente son difíciles de adquirir (hablando en términos de costos) por los estudiantes y/o el laboratorio.

### **3.2.3 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución espacial inicial.**

Una vez se obtuvieron los valores de voltaje que proveen la mejor resolución, se procedió a realizar una serie de simulaciones adicionales, variando las condiciones iniciales de los iones, con el fin de aproximarse a un sistema real y, de esta forma, poder observar cómo influyen dichas variaciones iniciales en los tiempos de vuelo de los iones; todas estas simulaciones se llevaron a cabo con los valores de voltaje a la mayor resolución del equipo.

En esta primera aproximación se usó un  $\Delta X$  en la posición inicial (se tomó este eje por ser el único que influye en los tiempos de llegada de los iones al detector) debido a que, en la realidad, los iones no están todos sobre un mismo punto de partida en el momento de ser ionizados por el láser, sino que poseen una distribución espacial inicial que depende directamente del spot del láser (volumen que ioniza el láser en la muestra) que varía de acuerdo con la potencia y el enfoque del láser.

#### **3.2.3.1 Volumen de ionización grande.**

Se supuso una situación extrema donde el volumen de ionización abarca todo el espacio entre las placas 1 y 2; este caso correspondería a un láser con muy alta potencia.

En la simulación se tomó el intervalo  $0,0001 \text{ mm} \leq X \leq 15,3701 \text{ mm}$  con  $\Delta X = 0,53 \text{ mm}$ , en donde se ubicaron 30 iones de igual masa; la carga de todos los iones fue +1; los ángulos polares de movimiento azimutal y de elevación fueron  $0^\circ$  y todos los iones tuvieron una energía cinética inicial de 0 eV; esta simulación se llevó a cabo para todos los iones de estudio.

#### **3.2.3.2 Volumen de ionización pequeño.**

En la realidad, el spot del láser se puede reducir con enfocamiento a valores  $<1,0 \text{ mm}$ .

Se tomó un valor igual a 1,0 mm en x y allí se ubicaron 30 iones con un  $\Delta x$  de separación igual a 0,0333 mm; el punto inicial es 4,5 mm y el centro de la distribución coincide con el punto de partida inicial, que se escogió para un sistema ideal (5 mm); los otros parámetros iniciales permanecieron constantes.

### 3.2.4 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución de energía cinética inicial.

Debido a que, en la realidad, los iones además de poseer una distribución espacial inicial también poseen una distribución de energía cinética inicial, se llevó a cabo otra simulación con esta condición inicial.

Para hallar el intervalo de energía cinética inicial de los iones, fue necesario recurrir a la teoría cinética de los gases y aplicar la ecuación de distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann (ecuación 20), para la componente de la velocidad en  $x$  ( $V_x$ ) y, de esta forma, hallar la anchura cuadrática media (ecuación 21) de dicha distribución, la cual se relaciona por medio de la ecuación 23 con la energía cinética inicial de los iones.

$$g(V_x) = \left( \frac{m}{2\pi KT} \right)^{1/2} e^{-\frac{mV_x^2}{2KT}} \quad (20)$$

Donde  $-1000 \leq V_x \leq 1000$ ;  $\Delta V_x = 0,1$ , siendo  $m$  la masa del ion dividida por el número de avogadro en Kg/átomo,  $K$  la constante de Boltzmann en J/K,  $T$  la temperatura en Kelvin,  $V_x$  componente en  $x$  de la velocidad del ion en m/s.

$$\left( \overline{V_x^2} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{KT}{m}} \quad (21)$$

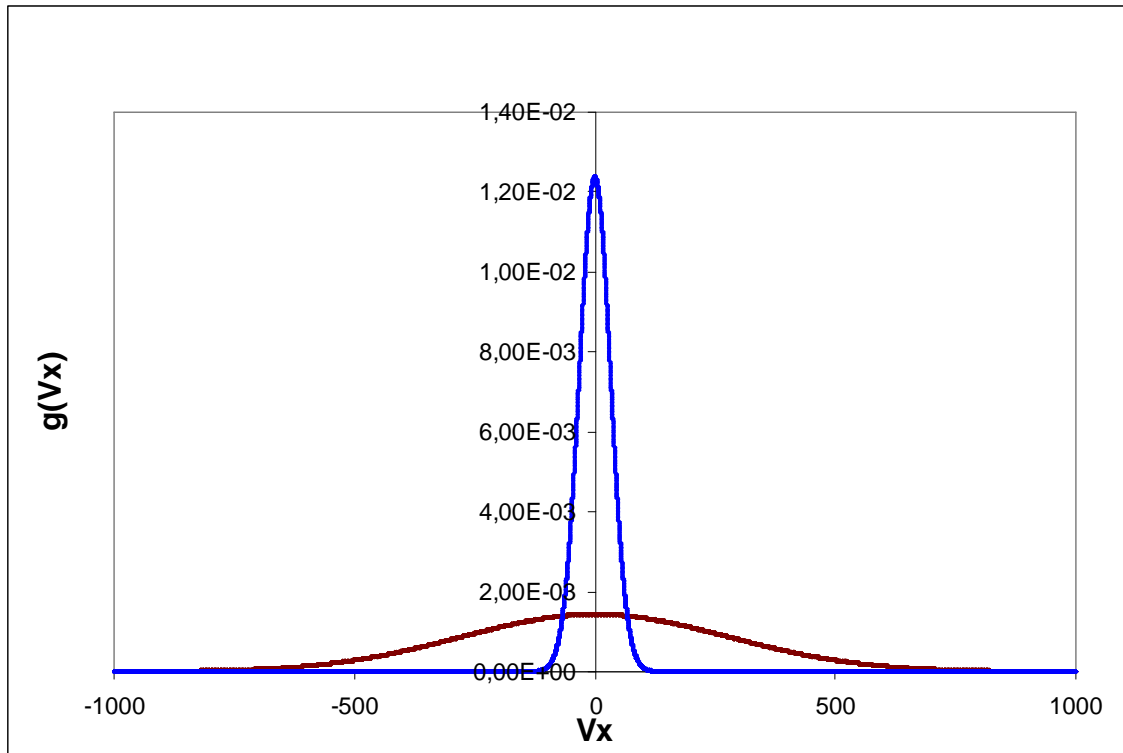
Donde  $\left( \overline{V_x^2} \right)^{1/2}$ : velocidad cuadrática media,  $K$  la constante de Boltzmann en J/K,  $m$  la masa del ion dividida por el número de avogadro en Kg/átomo y  $T$  la temperatura en Kelvin.

$$E_K = \frac{1}{2} m \left( \overline{V_x^2} \right)^2 \quad (22)$$

Donde  $E_K$ : Energía cinética.

La distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann para el ion  $O_2^+$  se realizó a 298 K y 4 K (Figura 14), estos valores de temperatura corresponden a la temperatura de entrada del gas al sistema por efusión y por haces moleculares, respectivamente; esto se realizó para comparar el efecto de la temperatura de entrada del gas en la distribución inicial de energía cinética de los iones y analizar los valores de tiempo de vuelo para las dos temperaturas.

Para los demás iones de estudio la distribución de velocidades se realizó solo a 298 K (anexo C).



**Figura 14.** Función de distribución de  $V_x$  para el ion  $O_2^+$  a 298 K (café) y 4 K (azul) respectivamente.

Después de aplicar las ecuaciones 21 y 22 se obtuvieron:  $E_{\text{kinicial}} = 12,84 \cdot 10^{-3}$  eV a 298 K y  $E_{\text{kinicial}} = 1,72 \cdot 10^{-4}$  eV a 4 K; teniendo en cuenta estos valores se procedió a realizar las respectivas simulaciones tomando un grupo de 15 iones de igual masa con carga +1; vector posición inicial (5,0,0); los ángulos polares de movimiento azimutal y de elevación iguales a  $0^\circ$  y una energía cinética inicial de 0 eV con  $\Delta E_k = 8,56 \cdot 10^{-4}$  eV a 298 K y  $\Delta E_k = 1,15 \cdot 10^{-5}$  eV a 4 K. Esta simulación se llevó a cabo para todos los iones de estudio.

### 3.2.5 Simulación de un sistema de 30 iones con una distribución inicial espacial y de energía cinética.

Para lograr una aproximación más cercana a un sistema real, se realizó una última simulación en la cual existen, simultáneamente, una distribución en la posición inicial de las partículas y una distribución en su energía cinética inicial a 298 K; los valores de distribución (condiciones iniciales) fueron los mismos usados en los numerales 3.2.3.2 y 3.2.4.

### 3.3 ESPECTRO SIMULADO.

Por último, se elaboró un espectro simulado de acuerdo con los valores arrojados por la simulación descrita en el numeral 3.2.5, donde hay una

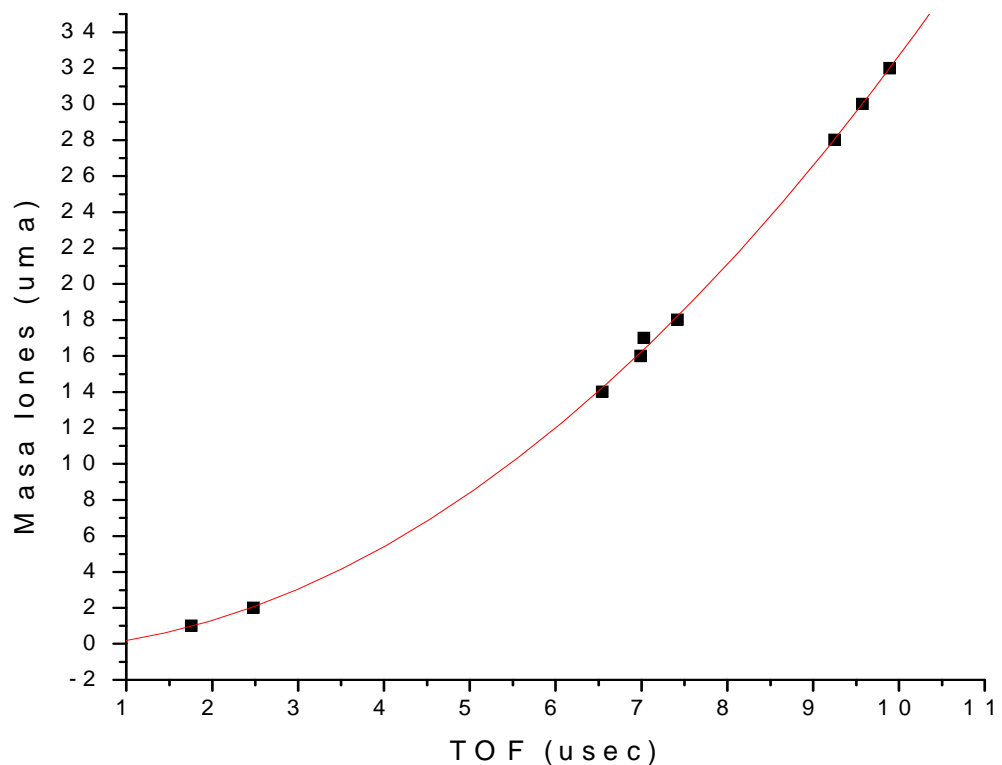
distribución espacial y de energía cinética inicial simultáneamente; estos valores de tiempo de vuelo se relacionaron, de acuerdo a la posición de los iones en el volumen de ionización, con la anchura cuadrática media de la distribución de velocidades de Maxwell- Boltzmann y, de esta forma, se hallaron los valores de  $g(V_x)$ , los cuales se relacionan directamente con la intensidad de los picos en el espectro.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 VALORES ÓPTIMOS DE POTENCIAL

Después de obtener los valores de tiempo de vuelo de los iones de estudio a los diferentes valores de potencial entre las placas 1 y 2 para un sistema ideal con un solo ion, se procedió a analizar a qué valores de potencial se encontraba la mejor resolución del equipo y se encontró que esto sucede cuando la placa 1= 800 V y la placa 2= 400 V, en éste caso la resolución se relacionó directamente con el  $\Delta$ TOF de los iones continuos de diferente masa.

La gráfica de Masa de los iones Vs Tiempo de vuelo a dicha resolución se presenta a continuación:



**Figura 15.** Masa de Iones (uma) Vs tiempo de vuelo ( $\mu$ sec) de la mejor resolución para el equipo obtenida por las simulaciones.

En la tabla 2 se presentan los valores de tiempo de vuelo, velocidad y diferencias entre los tiempos de vuelo para los iones a dicho potencial.

**Tabla 2.** Valores de tiempo de vuelo y velocidad para los iones de estudio a la mejor resolución del equipo obtenida por las simulaciones

ion	Masa iones (uma)	TOF (μsec)	V (mm/usec)	Δt
H <sup>+</sup>	1,0079	1,75473	356,129	-----
H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2,0158	2,48156	251,821	<b>0,72683</b>
N <sup>+</sup>	14,0067	6,54137	95,5319	<b>4,05981</b>
O <sup>+</sup>	15,9994	6,99122	89,3849	<b>0,44985</b>
OH <sup>+</sup>	17,0073	7,20806	86,6959	<b>0,21684</b>
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	18,0152	7,41857	84,2358	<b>0,21051</b>
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	28,0134	9,2509	67,5512	<b>1,83233</b>
NO <sup>+</sup>	30,0061	9,57427	65,2697	<b>0,32337</b>
O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	31,9988	9,88707	63,2047	<b>0,3128</b>
Ar <sup>+</sup>	39,948	11,0471	56,5677	<b>1,16003</b>

La ecuación que relaciona el tiempo de vuelo de los iones con su masa (figura 16) en un tubo de tiempo de vuelo de 60 cm de longitud con un  $\Delta E = 123636,36$  V/m, se obtuvo utilizando el programa OriginPro 7,5 y está dada por:

$$y = -0,30976 + 0,18188x + 0,31181x^2 \quad (23)$$

con  $r = 0,99947$ .

Esta ecuación describe, para los iones, un comportamiento similar al esperado de acuerdo a la ecuación 17 (física Newtoniana/Mecánica relativista), reflejando la proximidad de los datos obtenidos mediante las simulaciones, con los esperados experimentalmente.

Al analizar los datos arrojados por el simulador para los iones con masas de 500,700 y 900 uma (anexo D) bajo las mismas condiciones iniciales de los iones de estudio, se observa que siguen el mismo comportamiento descrito por la ecuación 23.

## 4.2 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DE LOS IONES POR UNA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL.

### 4.2.1 Volumen grande de Ionización.

Los valores obtenidos a estas condiciones iniciales se encuentran en el anexo E, a continuación se muestra la tabla que los resume:

**Tabla 3.** Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial en un volumen grande de ionización.

Masa iones (uma)	Intervalo TOF (µsec)	A	B
<b>1,0079</b>	1,61641-2,12328	0,50687	1,86984
<b>2,0158</b>	2,28594-3,00278	0,71684	2,64436
<b>14,0067</b>	6,02572-7,9153	1,8896	6,97051
<b>15,9994</b>	6,44011-8,45963	2,01952	7,44987
<b>17,0073</b>	6,63986-8,72202	2,08216	7,68094
<b>18,0152</b>	6,83378-8,97675	2,14297	7,90526
<b>28,0134</b>	8,52166-11,1939	2,6722	9,85778
<b>30,0061</b>	8,81954-11,5852	2,7657	10,20237
<b>31,9988</b>	9,10769-11,9637	2,8560	10,53569
<b>39,948</b>	10,1763-13,3674	3,1911	11,77185

Siendo  $A=|\Delta t|=|t_f - t_i|$  del intervalo (µsec)

$$B = \frac{t_i - t_f}{2} : \text{Valor promedio del intervalo TOF (µsec)}$$

Al analizar los intervalos TOF de los iones en un volumen grande de ionización (todo el espacio entre la placa 1 y 2) se observa que hay superposición de los intervalos de tiempo de vuelo entre los iones de masa cercana; estos intervalos de tiempo de vuelo se relacionan directamente con el ancho de los picos en el espectro, al existir superposición en los intervalos hay solapamiento de los picos, lo cual se traduce en una baja resolución del equipo. Adicionalmente, se observa que, al aumentar la masa de los iones, los picos se hacen más anchos es decir que, para los iones más pesados, la resolución es aún más baja.

Como era de esperarse hay un aumento en los tiempos de vuelo (TOF) para los iones con una distribución inicial espacial (tabla 3) en comparación con los obtenidos para un sistema ideal (tabla 2).

#### 4.2.2 Volumen pequeño de ionización.

La información obtenida bajo estas condiciones iniciales se encuentra en el anexo F, a continuación se muestra la recopilación de estos datos en la tabla 4:

**Tabla 4.** Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial, en un volumen pequeño de ionización.

Masa iones (uma)	Intervalo TOF (µsec)	X	A	B
1,0079	1,73937-1,76909	-----	0,0298	1,75423
2,0158	2,45984-2,50186	0,69075	0,0420	2,48085
14,0067	6,48411-6,59489	3,98225	0,1108	6,53950
15,9994	6,93002-7,04842	0,33513	0,1184	6,98922
17,0073	7,14497-7,26704	0,09655	0,1221	7,20601
18,0152	7,35364-7,47927	0,08660	0,1256	7,41645
28,0134	9,16992-9,32659	9,69065	0,1567	9,24825
30,0061	9,49046-9,65261	0,16387	0,1621	9,57153
31,9988	9,80053-9,96797	0,14792	0,1674	9,88425
39,948	10,9504-11,1375	0,98243	0,1871	11,04395

Siendo  $x =$  Distancia de separación entre los intervalos TOF (µsec)

$$A = |\Delta t| = |t_f - t_i| \text{ del intervalo (µsec)}$$

$$B = \frac{t_i - t_f}{2} : \text{Valor promedio del intervalo TOF (µsec)}$$

Al analizar los intervalos de TOF (tabla 4) para una distribución espacial inicial en un volumen pequeño de ionización, se observa que no se presenta superposición de los intervalos, lo que conlleva a un aumento en la resolución.

Asumiendo la distancia de separación entre los picos en el espectro como la diferencia entre el primer término de un intervalo dado con el último término del intervalo anterior, se observa que los picos más cercanos corresponden a los iones de masa: 15,9994; 17,0073 y 18,0152 umas (donde las diferencias de masa son 1,0079 uma) con una distancia de separación entre los picos de 0,09655 y 0,08660 respectivamente (color morado); sin embargo entre los iones con masa 1,0079 y 2,0158 uma también existe una diferencia de masa de 1,0079 y la distancia de separación de los picos es de 0,69075 (color amarillo), lo cual demuestra de nuevo que, al aumentar la masa de los iones, la resolución del equipo disminuye. Este comportamiento se observó en todas las simulaciones.

La misma situación se observa para los picos de 28,0134, 30,0061 y 31,9988 uma donde la distancia de separación entre los picos es de 0,16387 y 0,14792 respectivamente (color verde) a pesar de que la diferencia en la masa para todos es la misma (1,9927 uma), la distancia de separación entre los picos disminuye al aumentar el valor de la masa.

### 4.3 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DE LOS IONES POR UNA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA INICIAL.

#### 4.3.1 Variación en los tiempos de vuelo de los iones a 298K.

Después de observar los efectos de la distribución espacial inicial en los TOF de los iones, se procedió a realizar otra simulación, en la cual se varió la energía cinética inicial de los iones para una temperatura de 298 K, los datos obtenidos están en el anexo G.

A continuación se muestra la tabla que resume la información recolectada con esta simulación:

**Tabla 5.** Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución de energía cinética inicial a 298 K.

Masa iones (uma)	Intervalo TOF (µsec)	x	A	B
1,0079	0,738134-1737574	-----	$5,6 \cdot 10^{-4}$	0,73785
2,0158	1,04388-1,04308	0,30631	$8,0 \cdot 10^{-4}$	1,04348
14,0067	2,751620-2,74957	1,70854	$2,05 \cdot 10^{-3}$	2,75059
15,9994	2,94087-2,93865	0,19130	$2,22 \cdot 10^{-3}$	2,93976
17,0073	3,03207-3,0298	0,09342	$2,27 \cdot 10^{-3}$	3,03093
18,0152	3,12064-3,11828	0,09084	$2,36 \cdot 10^{-3}$	3,11946
28,0134	3,89142-3,88847	0,77314	$2,95 \cdot 10^{-3}$	3,88994
30,0061	4,02745-4,0244	0,13898	$3,05 \cdot 10^{-3}$	4,02592
31,9988	4,15903-4,15587	0,13463	$3,16 \cdot 10^{-3}$	4,15745
39,948	4,64699-4,64347	0,49112	$3,52 \cdot 10^{-3}$	4,64523

Siendo  $x =$  Distancia de separación entre los intervalos TOF (µsec).

$$A = |\Delta t| = |t_f - t_i| \text{ del intervalo (µsec)}$$

$$B = \left| \frac{t_i - t_f}{2} \right| : \text{Valor promedio del intervalo TOF (µsec)}$$

Al comparar los intervalos TOF de los iones, cuando tienen una distribución espacial en un volumen pequeño de ionización (tabla 4, con los que tienen una distribución en la energía cinética inicial a 298 K (tabla 5), el intervalo es menor en los iones que poseen una energía cinética inicial; esto se traduce en un pico más angosto en el espectro.

Al observar el espaciamiento entre los intervalos TOF (distancia de separación entre los picos), éste es menor para los iones que poseen energía cinética inicial, lo cual representa una disminución en la resolución del espectro bajo estas condiciones con respecto a los iones que solo poseen una distribución inicial espacial en un volumen pequeño de ionización.

Se puede decir que en general la energía cinética inicial de los iones afecta en mayor proporción el espaciamiento entre los picos, mientras que la distribución espacial afecta en mayor medida el ancho del pico (intervalo de TOF).

#### 4.3.2 Variación en los tiempos de vuelo de los iones a 4 K.

La temperatura de entrada de un gas como un haz molecular corresponde a los 4 K; los datos de la simulación con una distribución de energía cinética inicial a dicha temperatura se encuentran en el anexo H, el resumen de los datos obtenidos se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 6.** Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución de energía cinética inicial a 4 K.

Masa iones (uma)	Intervalo TOF (µsec)	x	A	B
1,0079	0,737881-0,737817	-----	$6,4 \cdot 10^{-5}$	0,73785
2,0158	1,04351-1,04343	0,30569	$8,0 \cdot 10^{-5}$	1,04347
14,0067	2,75069-2,75047	1,70726	$2,2 \cdot 10^{-4}$	2,75058
15,9994	2,93988-2,93961	0,18941	$2,7 \cdot 10^{-4}$	2,93974
17,0073	3,03106-3,03079	0,09145	$2,7 \cdot 10^{-4}$	3,03092
18,0152	3,11959-3,1193	0,08888	$2,9 \cdot 10^{-4}$	3,11944
28,0134	3,8901-3,88975	0,77080	$3,5 \cdot 10^{-4}$	3,88992
30,0061	4,02608-4,02572	0,13633	$3,6 \cdot 10^{-4}$	4,02591
31,9988	4,15759-4,15725	0,13187	$3,4 \cdot 10^{-4}$	4,15742
39,948	4,64539-4,64501	0,48814	$3,8 \cdot 10^{-4}$	4,64520

Siendo  $x$  = Distancia de separación entre los intervalos TOF (µsec).

$$A = |\Delta t| = |t_f - t_i| \text{ del intervalo (µsec).}$$

$$B = \frac{|t_i - t_f|}{2} : \text{ Valor promedio del intervalo TOF (µsec).}$$

Al comparar los valores promedio del intervalo TOF entre los iones que poseen una energía cinética inicial para 298 K (tabla 5) y para 4 K (tabla 4), se observa que hay una variación en las últimas dos cifras decimales; esto indica que la influencia de la temperatura de entrada de la muestra, en los tiempos de llegada de los iones al detector, no es muy marcada; sin embargo el ancho del pico sí resulta afectado ya que, a menor temperatura, se observa un pico más angosto; este resultado era de esperarse, de acuerdo a la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann ( figura 14).

#### 4.4 VARIACIÓN EN LOS TIEMPOS DE VUELO DEBIDO A UNA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL INICIAL EN UN VOLUMEN PEQUEÑO DE IONIZACIÓN Y A UNA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA INICIAL EN LOS IONES A 298 K.

Por último, como sistema más aproximado a la realidad, se tomó aquel en el cual existe simultáneamente una distribución en la energía cinética inicial y una distribución en la posición inicial a 298 K; los resultados obtenidos se encuentran en el anexo I y la recopilación de estos datos se presenta a continuación:

**Tabla 7.** Cambios en los TOF del grupo de 30 iones para los diferentes valores de masa cuando hay una distribución espacial inicial y una distribución de energía cinética inicial a 298 K.

Masa iones (uma)	Intervalo TOF (µsec)	x	A	B
1,0079	0,734987-0,740505	-----	$5,52 \cdot 10^{-3}$	0,73775
2,0158	1,03942-1,04723	0,29891	$7,81 \cdot 10^{-3}$	1,04332
14,0067	2,7399-2,76049	1,69267	$2,06 \cdot 10^{-2}$	2,75019
15,9994	2,92835-2,95032	0,16786	$2,20 \cdot 10^{-2}$	2,93933
17,0073	3,01917-3,04183	0,06885	$2,27 \cdot 10^{-2}$	3,03050
18,0152	3,10734-3,13067	0,06551	$2,33 \cdot 10^{-2}$	3,11901
28,0134	3,87484-3,90392	0,74417	$2,91 \cdot 10^{-2}$	3,88938
30,0061	4,01028-4,04039	0,10636	$3,01 \cdot 10^{-2}$	4,02533
31,9988	4,14129-4,17239	0,10090	$3,11 \cdot 10^{-2}$	4,15684
39,948	4,62719-4,66192	0,45480	$3,47 \cdot 10^{-2}$	4,64455

Siendo  $x =$  Distancia de separación entre los intervalos TOF (µsec).

$$A = |\Delta t| = |t_f - t_i| \text{ del intervalo (µsec).}$$

$$B = \left| \frac{t_i - t_f}{2} \right| : \text{Valor promedio del intervalo TOF (µsec).}$$

Al comparar los intervalos TOF de los iones, cuando tienen solo una distribución espacial inicial (tabla 4) y cuando tienen solo una distribución de energía cinética inicial a 298 K (tabla 5), con aquellos que poseen estas dos condiciones iniciales simultáneamente (tabla 7), se observa una disminución en estos valores para aquellos que poseen las dos condiciones simultáneas, es decir que los picos son más angostos para los iones que tienen éstas últimas dos condiciones iniciales.

Al analizar el valor promedio del intervalo TOF de las 3 situaciones, se observa que los tiempos de vuelo se mantienen casi iguales para los iones con energía cinética inicial y distribución espacial con respecto a los que solo tienen una distribución en la energía cinética inicial es decir que, en general, los tiempos de vuelo se ven afectados por la energía cinética inicial de los iones, la cual depende del sistema de entrada de la muestra.

Por último al comparar el espaciamiento entre los intervalos TOF (distancia entre los picos) se observa que disminuyó, cuando se presentan simultáneamente una distribución espacial y de energía cinética inicial, aunque los valores son muy cercanos a los obtenidos cuando el grupo de iones solo tiene una distribución en la energía cinética inicial.

#### 4.5 ESPECTRO SIMULADO

La gráfica de  $g(V_x)$  Vs TOF ( $\mu\text{sec}$ ) representa el espectro simulado del tubo de tiempo de vuelo construido en el Laboratorio de Espectroscopía de Atómico Molecular.

En la figura 16 se observa la gráfica completa con los 10 iones de estudio, sin embargo no se aprecian muy bien la distribución de los picos, por ésta razón se dividió el espectro en 6 secciones con ampliación (figuras 17-22).

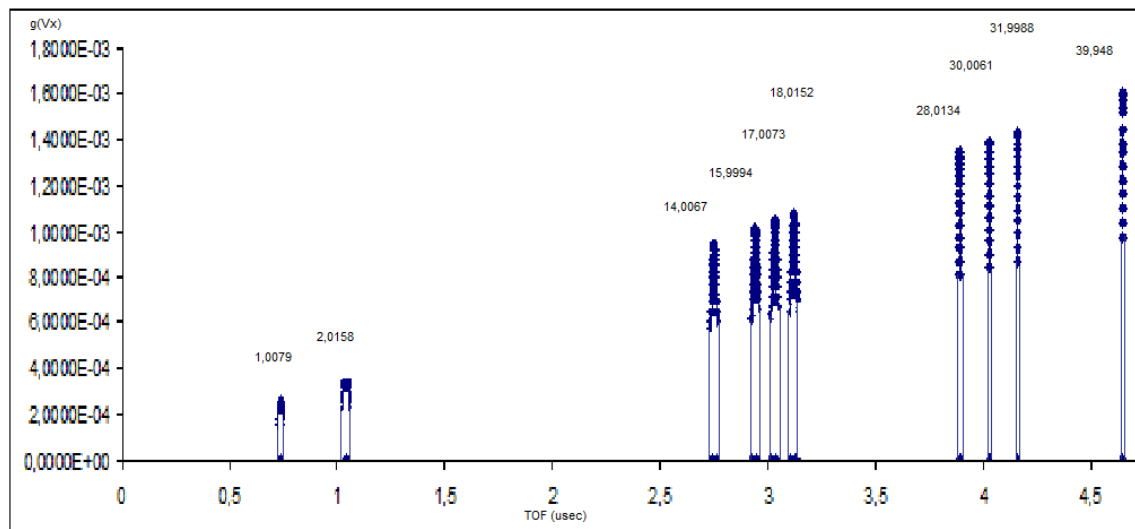


Figura 16. Espectro simulado.

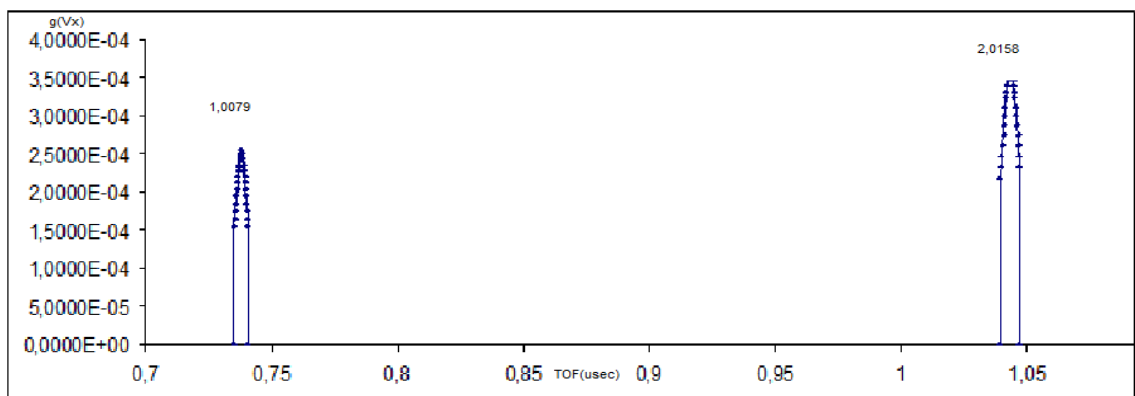
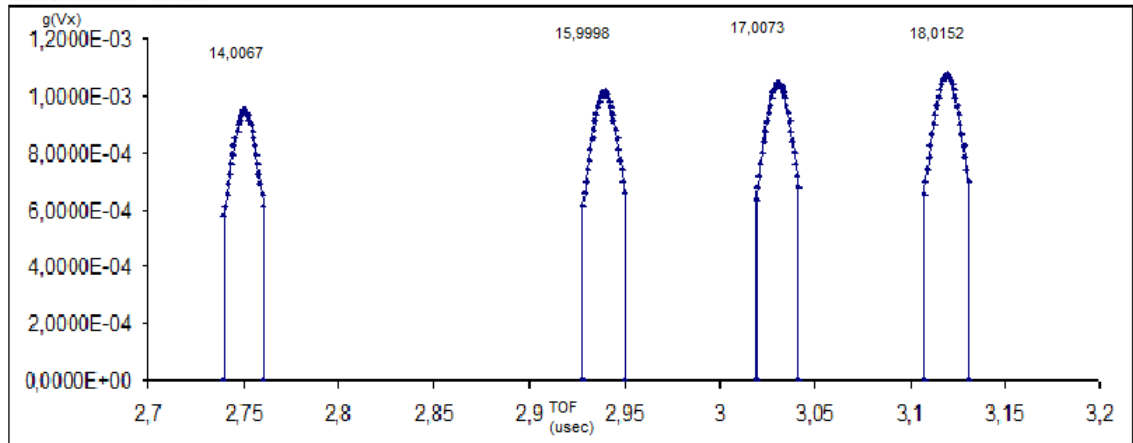
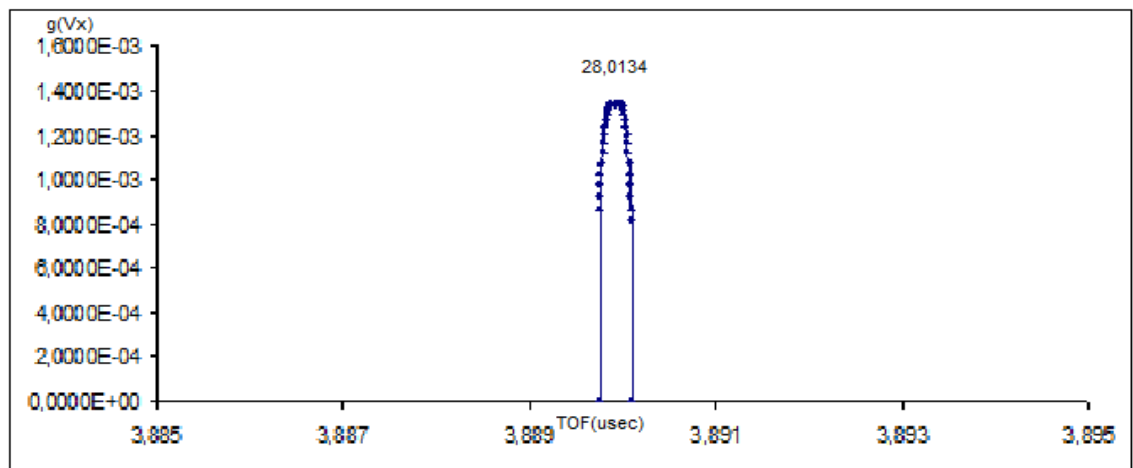


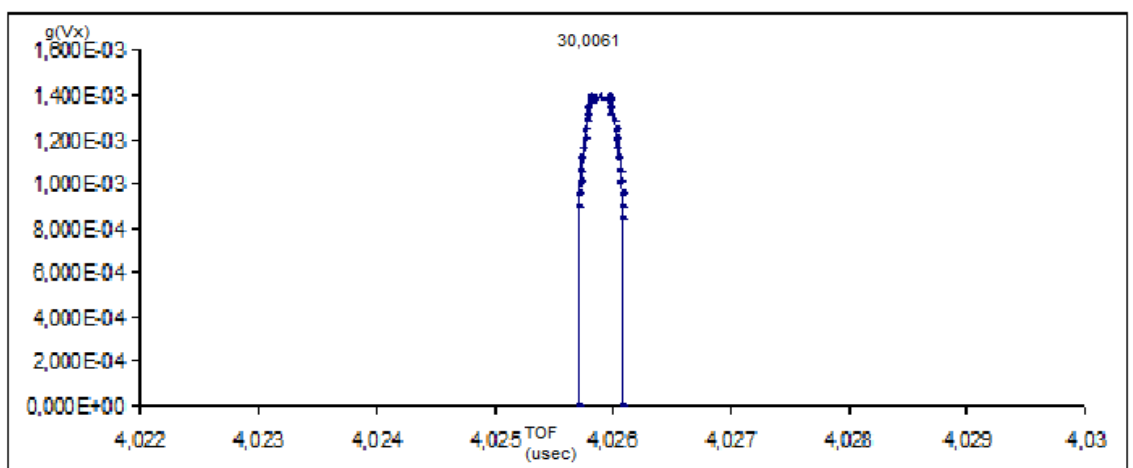
Figura 17. Primera sección ampliada del espectro simulado.



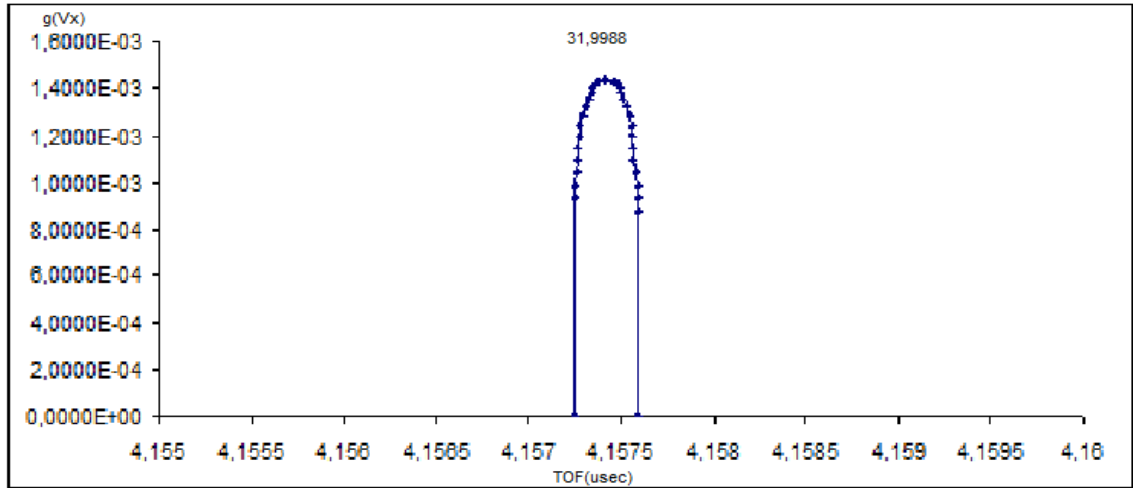
**Figura 18.** Segunda sección ampliada del espectro simulado.



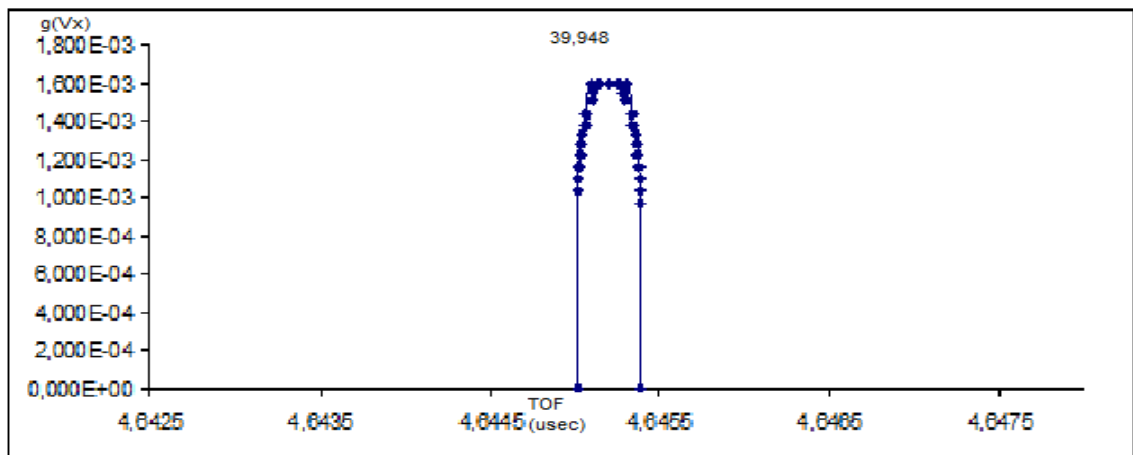
**Figura 19.** Tercera sección ampliada del espectro simulado.



**Figura 20.** Cuarta sección ampliada del espectro simulado.



**Figura 21.** Quinta sección ampliada del espectro simulado.



**Figura 22.** Sexta sección ampliada del espectro simulado.

## 5. CONCLUSIONES

- Mediante el uso del programa SIMION 3D VERSION 7.00 ® se logró construir un tubo de tiempo de vuelo lineal y, también, simular el comportamiento de los iones en este instrumento para obtener los valores de voltaje que proporcionan la mejor resolución del mismo. Además, se pudieron obtener las variaciones de los tiempos de vuelo de los iones a diferentes condiciones iniciales con el fin de lograr una aproximación cercana a un sistema real y observar cómo dichas condiciones afectan a los iones dentro del instrumento.
- Es posible lograr el diseño y la optimización de un equipo, para uso científico, con la ayuda de un software especializado, sin necesidad de tener el equipo físico, lo cual ahorra tiempo y dinero en la construcción del mismo, pues es posible realizar correcciones y predicciones del sistema a priori.
- Estas simulaciones constituyen la primera aproximación para lograr la calibración del tubo de tiempo de vuelo construido en el Laboratorio de Emisión Atómica y Molecular, para el estudio de la multifotoionización molecular ya que, debido a diferentes contratiempos, aún no se puede obtener un espectro con el cual se pueda realizar la calibración, pues es necesario invertir más dinero en el proyecto y no se cuenta con dichos recursos.
- La resolución de un tubo de tiempo de vuelo se ve afectada por varios factores pero, en general, se puede decir que el ancho de los picos está determinado por la distribución en la posición inicial de los iones, mientras que el espaciamiento entre los picos está determinado por la energía cinética de los iones, la cual depende en cierta medida del sistema de introducción de la muestra.
- Al tener claros los conceptos utilizados en este trabajo fue posible obtener un espectro simulado, con el cual tenemos una idea general de la resolución del instrumento.

## 6. RECOMENDACIONES

- De acuerdo con las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander, en los últimos 10 años, este es el primer trabajo realizado en conjunto con la Escuela de Física, para la generación de instrumentación científica con fines pedagógicos y, de esta forma, poder desarrollar conocimiento desde nuestra institución; es importante seguir incentivando proyectos de este tipo, con el fin de consolidar una población estudiantil científicamente activa en todos los aspectos.
- Se debe tener cuidado con la creación del instrumento en el programa, porque cualquier variación en los parámetros iniciales, afecta en diferente proporción los datos arrojados, tergiversando los análisis y las conclusiones que de allí se obtengan.
- Una vez se obtenga el primer espectro con el tubo de tiempo de vuelo, es necesario recurrir a los anexos de este trabajo para llevar a cabo la calibración del equipo e iniciar los estudios de multifotoionización molecular.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. **DAHL D. A., TIMOTHY R.M.**, Comparison of ion trajectories in vacuum and viscous environments using SIMION: Insights for instrument design. *Int.J. of Mass Spectrom.*, 266, 156-165 (2007).
2. **HOFFMANN E., STROOBANT V.** Mass spectroscopy, principles y aplicaciones. 2nd Ed.1999.
3. **GUILHAUS M., SELBY D., Y MLYNSKI V.** *Mass Spectrom. Rev.* 19, 65 (2000).
4. **CHAPMAN J. R.** Computers in mass spectrometry. London: Academic Press Inc (London) Ltd, 1978).
5. **DEMPSTER A. J.** 'A New Method of positive Ray Analysis' *physical review*, vol 11, pp 316-325, 1918).
6. **STEPHENS W.E.** "A pulsed Mass Spectrometer with Time Dispersion" *physical review*, vol 69, pp 691, 1946).
7. **CAMERON A. E. and EGGERS D. F.** 'An Ion 'velocitron''. *Review of Scientific Instruments*, vol 19, pp 605-607, 1948).
8. **WOLLNIK H.** Ion optics in mass spectrometers , *J. Mass Spectrom.*1999,Vol 34,Issue 10, 991-1006.
9. **MAMYRIN B.A.** Time-of-flight mass spectrometry (concepts,achievements,and prospects) *International Journal of Mass Spectrometry.*2001,Vol 206 , 251.
10. **GUILHAUS, M.** Tutorial. Principles and instrumentation in time-of-flight mass spectrometry. *Physical and instrumental concepts .J. Mass Spectrom.*1995 Vol 30, Issue 11, 1519-1532.
11. **WILEY W. C. and McLAREN I.H.** Time-of-Flight Mass Spectrometer with Improved Resolution. *Rev. Sci. Instrum.*1955,Vol 26, 1150.
12. **JOHNSON P. M, BERMAN M. R, y ZAKHEIM D.** Nonresonant multiphoton ionization spectroscopy: The four-photon ionization spectrum of nitric oxide *J. Chem. Phys.* 1975, Vol 62, 2500 .
13. **COLES J.N. and GUILHAUS. M.** 'Resolution limitations for detector pulse-width and Ritter in a linear orthogonal-acceleration time-of-flight

- spectrometer' Journal of American society for mass spectrometry. Vol 5 pp 772-778, 1994.
14. **MARSHALL A.G.** Scaling MS plateaus with high-resolution FT-ICRMS et al, A. chem.74(9), 252 A,2002.
  15. **ZANDEE L, BERNSTEIN R. B, y LICHTIN D. A.** Vibronic/mass spectroscopy via multiphoton ionization of a molecular beam: The I<sub>2</sub> molecule . J. Chem. Phys. 1978, Vol. 69, 3427.
  16. **ZANDEE L, BERNSTEIN R. B** .Laser ionization mass spectrometry:Extensive fragmentation via resonance-enhanced multiphoton ionization of a molecular benzene beam J. Chem. Phys. 1979,Vol 70, 2574.
  17. **ZANDEE L, BERNSTEIN R. B.** Resonance-enhanced multiphoton ionization and fragmentation of molecular beams: NO,I<sub>2</sub>,benzene, and butadiene. J. Chem. Phys. 1979, Vol.71, 1359.
  18. **LICHTIN D. A., DATTA-GHOSH S., NEWTON K. R., y BERNSTEIN R. B.** Laser multiphoton ionization in a time-of-flight mass spectrometer: vibronic/mass spectra of triethylenediamine from 425 to 560 nm. Chem. Phys. Lett.1980, Vol 75, 214.
  19. **NEWTON K. R., LICHTIN D. A. y BERNSTEIN R. B.** Two-color laser study of the multiphoton ionization and fragmentation of triethylenediamine J. Phys. Chem. 1981.Vol 85, 15-17.
  20. **PARKER D. H., BERNSTEIN R. B., y LICHTIN D. A.** Multiphoton ionization-fragmentation patterns of tertiary amines. J. Chem. Phys. 1981,Vol 75, 2577.
  21. **LICHTIN D. A., BERNSTEIN R. B., y NEWTON K. R.** Experimental appraisal of the maximal-entropy theory of multiphoton ionization-fragmentation:The alternative ionization pathway test. J. Chem. Phys. 1981,Vol .75, 5729.
  22. **PARKER D. H., y BERNSTEIN R. B.** Multiphoton ionization-fragmentation patterns of alkyl iodides.J. Phys. Chem. 1982, Vol 86, 60-66.
  23. **NEUSSER H. J., y SCHLAG E. W.** Acc. Chem. Res. 1983, Vol 16, 355.
  24. **BOESL U., NEUSSER H. J., y SCHLAG E. W** Multi-photon ionization in the mass spectrometry of polyatomic molecules: Cross sections Chem. Phys. 1981, Vol 55, 193-204.

25. **BOESL U., NEUSSER H. J., y SCHLAG E. W.** Visible and UV multiphoton ionization and fragmentation of polyatomic molecules. *J. Chem. Phys.* 1980, Vol 72, 4327.
26. **BOESL U., NEUSSER H. J., y SCHLAG E. W.** Secondary excitation of ions in a multiphoton mass spectrometer *J. Chem. Phys.* 1982 Lett. 87, 1-6.
27. **DIETZ W., NEUSSER H. J., BOESL U., SCHLAG E. W. y LIN S. H..** A Model for Multiphoton Ionization Mass Spectroscopy with Application to Benzene *Chem. Phys.* 1982, Vol 66, 105-127.
28. **FELDMAN D. L., LENGEL R. K. y ZARE R. N..** "Multiphoton Ionization: A Method for Characterizing Molecular Beams and Beam Reaction Products," *Chem. Phys. Lett.* 52, 1977, 413-417.
29. **ANDERSON S. L., RIDER D. M. y ZARE R. N.** "Multiphoton Ionization Photoelectron Spectroscopy: A New Method for Determining Vibrational Structure of Molecular Ions, *Chem. Phys. Lett.* 93, 1982, 11-15.
30. **BOESL U., NEUSSER H. J., y SCHLAG E. W..** Isotope selective soft multiphoton ionization and fragmentation of polyatomic molecules *J. Amer. Chem. Soc.* 103, 1981, 5058 -5060.
31. **DAHL A. D.,** 'SIMION for the personal computer in reflection'. *Int. J. Mass Spectrom.* 200 (2000) 3.
32. ITSIM, <http://www.chem.purdue.edu/cooks/ITSIM form.htm>.
33. **DAHL A. D., McJUNKIN T. R. y SCOTT J. R.** Comparison of ion trajectories in vacuum and viscous environments using SIMION: Insights for instrument design. *J. of Mass Spectrometry.* 266, 2007, 156-165.
34. **OVALLE V., OTOMAR D. R., PEREIRA J. M y FERREIRA N.** Studying charged particle optics: an undergraduate course. *Euro J. Phys,* 29, 2008, 251-256.
35. **ANTOINE R., ARNAUD L., ABD EL RAHIM M. y BROYER M.** Distortion of ion trajectories in a time-of-flight mass spectrometer: simulations and experiments with a position sensitive detector. *Inter. Journal of Mass Spectrometry.* 239, 2004, 1-6.
36. **OKSMAN P.** A fourier transform time-of-flight mass spectrometer. A SIMION calculation approach. *Inter. Journal of Mass Spectrometry and ion processes* 141, 1995, 67-76.
37. **LORINCIK J., FRANZREB K., WILLIAMS P.** SIMION modeling of ion optical effects in Cameca ion microanalyzers: simulation of ion transmission losses. *Applied Surface Science* 231-231, 2004, 921-925.

38. **HANH LAI, McJUNKIN R. T., MILLER C., SCOTT J. R. y ALLMIRALL J.R.** The predictive power of SIMION/SDS simulation software for modeling ion mobility spectrometry instruments. *Inter. Journal of Mass Spectrometry*.276, 2008, 1-8.

## 8. ANEXOS

### Anexo A. Cantidades y unidades importantes en la derivación de las ecuaciones del analizador de tiempo de vuelo.

Quantity	Symbol	Description	Value/units
<b>Mass</b>	$m$	Mass	Kg
	$m$	Mass, with 1 Dalton defined to be 1/12 the mass of a carbon-12 atom	Da or amu
<b>Charge</b>	$q$	charge	C
	$e$	charge of a proton (unit charge)	$1,60218 \cdot 10^{-19}$
	$z$	number of unit charges ( $q/e$ )	
<b>Time</b>	$t$	Time-of-flight	s
	$t_0$	Time before or after $t=0$ that ion begins to accelerate	s
	$t_a$	Time that ion is in accelerating field	s
	$t_D$	Time ion spends in field free drift region (linear TOF)	s
	$t_d$	Response time of the detection system	s
<b>Displacement</b>	$s$	distance	m
	$s_0$	initial position of ion, relative to zero position	m
	$s_a$	distance over which accelerating field acts in a single stage accelerator	m
	$s_{a1}$	distance over which the first accelerating field acts in a dual stage accelerator	m
	$s_{a2}$	distance over which second accelerating field acts in a dual stage accelerator	m
	$D$	drift region, distance between end of accelerating region and detector (linear TOFMS)	m
	$D_{sf}$	location of the special focus plane, relative to the end of the accelerating region	m
	$D_1$	first drift region, distance between accelerating region and front of ion mirror	m
	$D_2$	second drift region, distance between front of ion mirror and detector	m
	$d$	distance an ion that started with ' $s_0$ ' and ' $u_0$ ' of zero would penetrate into the ion mirror	m
<b>Energy</b>	$U$	Translational (kinetic) energy of ions, either in joules (SI units) or eV	J or eV
	$U_0$	Initial translational energy of ions	J
	$U_D$	Energy of ion in D (linear TOFMS) or D1 and D2 (TOFMS with ion mirror)	J
<b>Velocity</b>	$u$	Velocity	$\text{ms}^{-1}$
	$u_0$	Initial velocity	$\text{ms}^{-1}$
	$u_D$	Drift velocity	$\text{ms}^{-1}$
<b>Electric field</b>	$E$	Electric field strength	$\text{Vm}^{-1}$
	$E_1$	Electric field in the first accelerating region of a dual stage accelerator	$\text{Vm}^{-1}$
	$E_2$	Electric field in the second accelerating region of a dual stage accelerator	$\text{Vm}^{-1}$

**Anexo B.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio, a diferentes valores de potencial.

- VOLTAJES: PLACA 1= 800 V/ PLACA 2= 400 V.**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,75473	356,129
2,0158	2,48156	251,821
14,0067	6,54137	95,5319
15,9994	6,99122	89,3849
17,0073	7,20806	86,6959
18,0152	7,41857	84,2358
28,0134	9,2509	67,5512
30,0061	9,57427	65,2697
31,9988	9,88707	63,2047
39,948	11,0471	56,5677

- VOLTAJES: PLACA 1= 1400 V/ PLACA 2= 400 V.**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,3541	454,476
2,0158	1,91499	321,364
14,0067	5,0479	121,914
15,9994	5,39504	114,069
17,0073	5,56238	110,638
18,0152	5,72483	107,489
28,0134	7,13881	86,206
30,0061	7,38835	83,294
31,9988	7,62974	80,659
39,948	8,52492	72,189

- VOLTAJES: PLACA 1= 1000 V/ PLACA 2= 400 V.**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,5856	391
2,0158	2,24238	276,482
14,0067	5,91089	104,887
15,9994	6,31737	98,138
17,0073	6,51332	95,186
18,0152	6,70354	92,485
28,0134	8,35926	74,166
30,0061	8,65146	71,662
31,9988	8,93412	69,394
39,948	9,98234	62,107

- VOLTAJES: PLACA 1= 800 V/ PLACA 2= 600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,74166	370,288
2,0158	2,46307	261,833
14,0067	6,49265	99,33
15,9994	6,93915	92,937
17,0073	7,15438	90,143
18,0152	7,36332	87,585
28,0134	9,182	70,237
30,0061	9,50296	67,865
31,9988	9,81344	65,718
39,948	10,9648	58,817

- VOLTAJES: PLACA 1= 1200 V/ PLACA 2= 400 V.**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,45258	424,937
2,0158	2,05426	300,476
14,0067	5,41501	113,99
15,9994	5,7874	106,655
17,0073	5,96691	103,447
18,0152	6,14117	100,511
28,0134	7,65799	80,603
30,0061	7,92568	77,881
31,9988	8,18462	75,417
39,948	9,1449	67,497

- VOLTAJES: PLACA 1=1000 V/ PLACA 2= 600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,55698	405,34
2,0158	2,2019	286,619
14,0067	5,80418	108,733
15,9994	6,20341	101,736
17,0073	6,39574	98,676
18,0152	6,58253	95,876
28,0134	8,20835	76,886
30,0061	8,49529	74,289
31,9988	8,77284	71,939
39,948	9,80214	64,384

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1200 V/ PLACA 2= 600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,43273	436,167
2,0158	2,02619	308,417
14,0067	5,34101	117,002
15,9994	5,70831	109,474
17,0073	5,88536	106,18
18,0152	6,05724	103,167
28,0134	7,55333	82,733
30,0061	7,81736	79,939
31,9988	8,07276	77,41
39,948	9,01992	69,281

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1000 V/ PLACA 2= 800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,56321	417,085
2,0158	2,21071	249,924
14,0067	5,82741	111,883
15,9994	6,22815	104,684
17,0073	6,42133	101,535
18,0152	6,60887	98,654
28,0134	8,2412	79,114
30,0061	8,52928	76,441
31,9988	8,80794	74,023
39,948	9,84136	66,25

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1400 V/ PLACA 2= 600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,33531	465,282
2,0158	1,88841	329,004
14,0067	4,97784	124,812
15,9994	5,32016	116,781
17,0073	5,48518	113,268
18,0152	5,64537	110,054
28,0134	7,03973	88,256
30,0061	7,28581	85,275
31,9988	7,52385	82,577
39,948	8,40661	73,906

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1200 V/ PLACA 2= 800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,42089	447,814
2,0158	2,00945	316,652
14,0067	5,29689	120,126
15,9994	5,66115	112,397
17,0073	5,83674	109,016
18,0152	6,0072	105,922
28,0134	7,49093	84,942
30,0061	7,75278	82,073
31,9988	8,00607	79,477
39,948	8,94541	71,131

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1600 V/ PLACA 2= 600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,25183	494,456
2,0158	1,77035	349,633
14,0067	4,66662	132,638
15,9994	4,98754	124,104
17,0073	5,14224	120,37
18,0152	5,29242	116,954
28,0134	6,5996	93,789
30,0061	6,8303	90,622
31,9988	7,05345	87,755
39,948	7,88102	78,54

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1400 V/ PLACA 2= 800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,32118	476,195
2,0158	1,86842	336,721
14,0067	4,92515	127,74
15,9994	5,26385	119,521
17,0073	5,42712	115,925
18,0152	5,58561	112,635
28,0134	6,96521	90,326
30,0061	7,20869	87,275
31,9988	7,4442	84,514
39,948	8,31762	75,639

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1600 V/ PLACA 2= 800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,24078	503,642
2,0158	1,75473	356,129
14,0067	4,62545	135,102
15,9994	4,94354	126,409
17,0073	5,09687	122,607
18,0152	5,24572	119,127
28,0134	6,54137	95,532
30,0061	6,77003	92,305
31,9988	6,99122	89,385
39,948	7,81148	79,999

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1400 V/ PLACA 2= 1000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,31533	487,216
2,0158	1,86016	344,514
14,0067	4,90336	130,696
15,9994	5,24056	122,287
17,0073	5,40311	118,608
18,0152	5,56091	115,242
28,0134	6,9344	92,416
30,0061	7,1768	89,295
31,9988	7,41127	86,47
39,948	8,28082	77,39

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1800 V/ PLACA 2= 800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,17554	529,166
2,0158	1,66247	374,177
14,0067	4,38226	141,949
15,9994	4,68362	132,816
17,0073	4,82889	128,82
18,0152	4,96992	125,165
28,0134	6,19745	100,373
30,0061	6,41408	96,983
31,9988	6,62364	93,915
39,948	7,40078	84,053

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1600 V/ PLACA 2= 1000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,23069	514,28
2,0158	1,74046	363,651
14,0067	4,58783	137,956
15,9994	4,90333	129,079
17,0073	5,05542	125,196
18,0152	5,20306	121,644
28,0134	6,48817	97,55
30,0061	6,71497	94,255
31,9988	6,93436	91,273
39,948	7,74795	81,689

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1200 V/ PLACA 2= 1000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,43327	459,141
2,0158	2,02695	324,662
14,0067	5,34302	123,165
15,9994	5,71046	115,24
17,0073	5,88758	111,773
18,0152	6,05953	108,601
28,0134	7,55618	87,091
30,0061	7,82031	84,149
31,9988	8,07581	81,487
39,948	9,02333	72,93

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1800 V/ PLACA 2= 1000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,16567	538,861
2,0158	1,64851	381,033
14,0067	4,34546	144,55
15,9994	4,64429	135,249
17,0073	4,78834	131,18
18,0152	4,92819	127,458
28,0134	6,1454	102,212
30,0061	6,36022	98,76
31,9988	6,56802	95,636
39,948	7,33863	85,593

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,10979	563,089
2,0158	1,56948	398,164
14,0067	4,13713	151,049
15,9994	4,42163	141,33
17,0073	4,55878	137,078
18,0152	4,69192	133,188
28,0134	5,85078	106,808
30,0061	6,0553	103,2
31,9988	6,25313	99,935
39,948	6,9868	89,441

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1800 V/ PLACA 2= 1200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,16016	548,457
2,0158	1,64071	387,818
14,0067	4,32489	147,124
15,9994	4,62231	137,658
17,0073	4,76568	133,516
18,0152	4,90486	129,728
28,0134	6,11632	104,032
30,0061	6,33012	100,519
31,9988	6,53693	97,339
39,948	7,3039	87,117

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1400 V/ PLACA 2= 1200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,3332	497,652
2,0158	1,88543	351,893
14,0067	4,97	133,495
15,9994	5,31178	124,906
17,0073	5,47653	121,148
18,0152	5,63648	117,71
28,0134	7,02863	94,396
30,0061	7,27433	91,207
31,9988	7,51199	88,322
39,948	8,39335	79,047

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,10095	573,237
2,0158	1,55698	405,34
14,0067	4,10418	153,771
15,9994	4,38462	143,877
17,0073	4,52247	139,549
18,0152	4,65455	135,589
28,0134	5,80418	108,733
30,0061	6,00707	105,06
31,9988	6,20333	101,736
39,948	6,93116	91,053

- **VOLTAJES: PLACA 1= 1600 V/ PLACA 2= 1200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,23154	523,665
2,0158	1,74166	370,288
14,0067	4,591	140,474
15,9994	4,90672	131,435
17,0073	5,05891	127,481
18,0152	5,20666	123,864
28,0134	6,49265	99,33
30,0061	6,71961	95,975
31,9988	6,93915	92,939
39,948	7,7533	83,179

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,05483	594,899
2,0158	1,49176	420,657
14,0067	3,93226	159,582
15,9994	4,20268	149,314
17,0073	4,33303	144,822
18,0152	4,45958	140,713
28,0134	5,56105	112,842
30,0061	5,75544	109,03
31,9988	5,94348	105,581
39,948	6,64082	94,494

- VOLTAJES: PLACA 1= 1600 V/ PLACA 2= 1400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,25307	533,392
2,0158	1,77211	377,165
14,0067	4,67127	143,083
15,9994	4,99251	133,876
17,0073	5,14736	129,849
18,0152	5,29769	126,164
28,0134	6,60617	101,175
30,0061	6,83709	97,758
31,9988	7,06047	94,665
39,948	7,88887	84,724

- VOLTAJES: PLACA 1= 2200 V/ PLACA 2= 1400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,04976	603,747
2,0158	1,48459	426,914
14,0067	3,91336	161,956
15,9994	4,18247	151,535
17,0073	4,3122	146,976
18,0152	4,43814	142,805
28,0134	5,53432	114,52
30,0061	5,72778	110,652
31,9988	5,91491	107,151
39,948	6,6089	95,9

- VOLTAJES: PLACA 1= 1800 V/ PLACA 2= 1400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,16291	557,743
2,0158	1,6446	394,384
14,0067	4,33515	149,615
15,9994	4,63327	139,988
17,0073	4,77698	135,777
18,0152	4,91649	131,924
28,0134	6,13082	105,794
30,0061	6,34513	102,221
31,9988	6,55244	98,987
39,948	7,32122	88,592

- VOLTAJES: PLACA 1= 2400 V/ PLACA 2= 1400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,00893	624,338
2,0158	1,42685	441,474
14,0067	3,76116	167,479
15,9994	4,01981	156,703
17,0073	4,14449	151,989
18,0152	4,26553	147,676
28,0134	5,31908	118,426
30,0061	5,50501	114,426
31,9988	5,68487	110,806
39,948	6,35186	99,17

- VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,09961	581,478
2,0158	1,55508	411,168
14,0067	4,09918	155,982
15,9994	4,38107	145,946
17,0073	4,51696	141,555
18,0152	4,64888	137,538
28,0134	5,79711	110,296
30,0061	5,99975	106,571
31,9988	6,19577	103,199
39,948	6,92271	92,362

- VOLTAJES: PLACA 1= 1800 V/ PLACA 2= 1600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,18706	566,882
2,0158	1,67875	400,846
14,0067	4,42518	152,067
15,9994	4,7295	142,282
17,0073	4,8762	138,002
18,0152	5,0186	134,086
28,0134	6,25815	107,527
30,0061	6,47691	103,896
31,9988	6,68852	100,609
39,948	7,47327	90,044

- VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,10535	589,847
2,0158	1,56321	417,085
14,0067	4,1206	158,227
15,9994	4,40397	148,046
17,0073	4,54057	143,592
18,0152	4,67318	139,518
28,0134	5,82741	111,883
30,0061	6,03111	108,105
31,9988	6,22815	104,684
39,948	6,95889	93,692

- VOLTAJES: PLACA 1= 2600 V/ PLACA 2= 1600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,965413	654,855
2,0158	1,3653	463,053
14,0067	3,59891	175,666
15,9994	3,84641	164,363
17,0073	3,96571	159,418
18,0152	4,08153	154,894
28,0134	5,08963	124,214
30,0061	5,26755	120,019
31,9988	5,43964	116,222
39,948	6,07786	104,018

- VOLTAJES: PLACA 1= 2200 V/ PLACA 2= 1600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,04951	611,957
2,0158	1,48423	432,719
14,0067	3,9124	164,158
15,9994	4,18146	153,596
17,0073	4,31115	148,975
18,0152	4,43706	144,747
28,0134	5,53,298	116,077
30,0061	5,72639	112,157
31,9988	5,91347	108,608
39,948	6,60729	97,204

- VOLTAJES: PLACA 1= 2000 V/ PLACA 2= 1800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,13151	598,497
2,0158	1,6002	423,202
14,0067	4,21811	160,547
15,9994	4,50819	150,217
17,0073	4,64802	145,698
18,0152	4,78376	141,564
28,0134	5,96531	113,524
30,0061	6,17383	109,69
31,9988	6,37554	106,22
39,948	7,12357	95,066

- VOLTAJES: PLACA 1= 2400 V/ PLACA 2= 1600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,00472	633,303
2,0158	1,42089	447,814
14,0067	3,74546	169,884
15,9994	4,00304	158,953
17,0073	4,1272	154,171
18,0152	4,24773	149,797
28,0134	5,29689	120,126
30,0061	5,48204	116,069
31,9988	5,66115	112,397
39,948	6,32536	100,594

- VOLTAJES: PLACA 1= 2200 V/ PLACA 2= 1800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,05615	620,301
2,0158	1,49363	438,619
14,0067	3,93718	166,396
15,9994	4,20794	155,69
17,0073	4,33846	151,006
18,0152	4,46516	146,721
28,0134	5,56802	117,66
30,0061	5,76265	113,686
31,9988	5,95093	110,089
39,948	6,64914	98,529

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2400 V/ PLACA 2= 1800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,00555	641,357
2,0158	1,42206	453,509
14,0067	3,74853	172,045
15,9994	4,00632	160,974
17,0073	4,13058	156,132
18,0152	4,25122	151,701
28,0134	5,30123	121,654
30,0061	5,48654	117,545
31,9988	5,66579	113,826
39,948	6,33055	101,873

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2200 V/ PLACA 2= 2000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,08397	628,529
2,0158	1,53296	444,438
14,0067	4,0409	168,603
15,9994	4,31879	157,754
17,0073	4,45274	153,009
18,0152	4,58279	148,667
28,0134	5,71469	119,22
30,0061	5,91446	115,194
31,9988	6,10769	111,549
39,948	6,82429	99,836

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2600 V/ PLACA 2= 1800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,963608	662,774
2,0158	1,36275	468,652
14,0067	3,59219	177,79
15,9994	3,83922	166,35
17,0073	3,9583	161,346
18,0152	4,0739	156,767
28,0134	5,08012	125,716
30,0061	5,2577	121,47
31,9988	5,42948	117,627
39,948	6,06651	105,276

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2400 V/ PLACA 2= 2000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,01348	649,323
2,0158	1,43327	459,141
14,0067	3,77809	174,182
15,9994	4,03791	162,974
17,0073	4,16315	158,071
18,0152	4,28473	153,586
28,0134	5,34302	123,165
30,0061	5,5298	119,005
31,9988	5,71046	115,24
39,948	6,38046	103,139

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2800 V/ PLACA 2= 1800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,930725	681,514
2,0158	1,31624	481,903
14,0067	3,4696	182,817
15,9994	3,70821	171,054
17,0073	3,82322	165,908
18,0152	3,93488	161,2
28,0134	4,90676	129,271
30,0061	5,07828	124,905
31,9988	5,24419	120,953
39,948	5,85948	108,252

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2600 V/ PLACA 2= 2000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,967048	669,471
2,0158	1,36761	473,387
14,0067	3,60501	179,586
15,9994	3,85292	168,031
17,0073	3,97243	162,976
18,0152	4,08844	158,351
28,0134	5,09825	126,987
30,0061	5,27647	122,698
31,9988	5,44886	118,816
39,948	6,08816	106,339

- VOLTAJES: PLACA 1= 2800 V/ PLACA 2= 2000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,930079	689,027
2,0158	1,31533	487,216
14,0067	3,4672	184,832
15,9994	3,70564	172,939
17,0073	3,82058	167,737
18,0152	3,93216	162,977
28,0134	4,90336	130,696
30,0061	5,07476	126,282
31,9988	5,24056	122,287
39,948	5,85543	109,445

- VOLTAJES: PLACA 1= 2600 V/ PLACA 2= 2200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,975994	677,1
2,0158	1,38026	478,782
14,0067	3,63836	181,633
15,9994	3,88857	169,946
17,0073	4,00918	164,833
18,0152	4,12627	160,156
28,0134	5,14542	128,434
30,0061	5,32528	124,096
31,9988	5,49927	120,17
39,948	6,14448	108

- VOLTAJES: PLACA 1= 3000 V/ PLACA 2= 2000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,898654	708,054
2,0158	1,27089	500,671
14,0067	3,35005	189,936
15,9994	3,58043	177,715
17,0073	3,69148	172,369
18,0152	3,79929	167,478
28,0134	4,73768	134,305
30,0061	4,90329	129,769
31,9988	5,06349	125,664
39,948	5,65757	112,468

- VOLTAJES: PLACA 1= 2800 V/ PLACA 2= 2200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,932968	696,447
2,0158	1,31941	492,462
14,0067	3,47796	186,823
15,9994	3,71714	174,802
17,0073	3,83244	169,543
18,0152	3,94436	3,33742
28,0134	4,91858	132,104
30,0061	5,09052	127,642
31,9988	5,25683	123,603
39,948	5,8736	110,624

- VOLTAJES: PLACA 1= 2400 V/ PLACA 2= 2200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,04276	657,188
2,0158	1,47469	464,703
14,0067	3,88727	176,291
15,9994	4,15459	164,948
17,0073	4,28346	159,986
18,0152	4,40855	155,446
28,0134	5,49743	124,657
30,0061	5,68959	120,447
31,9988	5,87548	116,636
39,948	6,56484	104,388

- VOLTAJES: PLACA 1= 3000 V/ PLACA 2= 2200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,898879	715,264
2,0158	1,27121	505,768
14,0067	3,35089	191,87
15,9994	3,58133	179,525
17,0073	3,69241	174,124
18,0152	3,80024	169,183
28,0134	4,73887	135,673
30,0061	4,90452	131,09
31,9988	5,06476	126,943
39,948	5,659	113,613

- **VOLTAJES: PLACA 1= 3200 V/ PLACA 2= 2200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,870193	733,381
2,0158	1,23064	518,579
14,0067	3,24395	196,73
15,9994	3,46703	184,072
17,0073	3,57457	178,534
18,0152	3,67896	173,468
28,0134	4,58763	139,109
30,0061	4,748	134,411
31,9988	4,90312	130,158
39,948	5,47839	116,491

- **VOLTAJES: PLACA 1= 3000 V/ PLACA 2= 2400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,902519	722,412
2,0158	1,27635	510,823
14,0067	3,36446	193,788
15,9994	3,59583	181,319
17,0073	3,70736	175,864
18,0152	3,81563	170,874
28,0134	4,75806	137,029
30,0061	4,92438	132,4
31,9988	5,08527	128,212
39,948	5,68191	114,748

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2600 V/ PLACA 2= 2400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,0067	684,647
2,0158	1,42368	484,12
14,0067	3,75282	183,657
15,9994	4,01089	171,841
17,0073	4,1353	166,671
18,0152	4,25607	161,941
28,0134	5,30728	129,866
30,0061	5,4928	125,479
31,9988	5,67226	121,51
39,948	6,33777	108,75

- **VOLTAJES: PLACA 1= 3200 V/ PLACA 2=2400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,87083	740,575
2,0158	1,23154	523,665
14,0067	3,24632	198,66
15,9994	3,46957	185,878
17,0073	3,57718	180,286
18,0152	3,68166	175,17
28,0134	4,591	140,474
30,0061	4,75148	135,729
31,9988	4,90672	131,435
39,948	5,48241	117,633

- **VOLTAJES: PLACA 1= 2800 V/ PLACA 2= 2400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,94272	703,785
2,0158	1,3332	497,652
14,0067	3,51432	188,791
15,9994	3,75599	176,643
17,0073	3,87249	171,329
18,0152	3,98559	166,468
28,0134	4,97	133,495
30,0061	5,14373	128,987
31,9988	5,31178	124,906
39,948	5,935	111,79

- **VOLTAJES: PLACA 1= 3400 V/ PLACA 2= 2400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,844008	758,266
2,0158	1,19361	536,176
14,0067	3,14634	203,406
15,9994	3,36271	190,318
17,0073	3,46701	184,592
18,0152	3,56826	179,354
28,0134	4,44959	143,83
30,0061	4,60513	138,972
31,9988	4,75558	134,575
39,948	5,31355	120,444

- VOLTAJES: PLACA 1= 2800 V/ PLACA 2= 2600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,974882	711,051
2,0158	1,37869	502,79
14,0067	3,63421	190,741
15,9994	3,88414	178,467
17,0073	4,0046	173,099
18,0152	4,12156	168,187
28,0134	5,13955	134,874
30,0061	5,31921	130,318
31,9988	5,493	126,195
39,948	6,13747	112,944

- VOLTAJES: PLACA 1= 3400 V/ PLACA 2= 2600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,845434	765,051
2,0158	1,19562	540,975
14,0067	3,15164	205,226
15,9994	3,36838	192,021
17,0073	3,47286	186,245
18,0152	3,57428	180,96
28,0134	4,4571	145,117
30,0061	4,6129	140,216
31,9988	4,76361	135,78
39,948	5,32251	121,522

- VOLTAJES: PLACA 1= 3000 V/ PLACA 2= 2600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,912925	729,498
2,0158	1,29107	515,834
14,0067	3,40325	195,689
15,9994	3,63729	183,097
17,0073	3,7501	177,589
18,0152	3,85962	172,55
28,0134	4,81292	138,373
30,0061	4,98116	133,699
31,9988	5,1439	129,469
39,948	5,74742	115,874

- VOLTAJES: PLACA 1= 3600 V/ PLACA 2= 2600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,820354	782,221
2,0158	1,16016	553,114
14,0067	3,05816	209,832
15,9994	3,26846	196,33
17,0073	3,36984	190,424
18,0152	3,46826	185,02
28,0134	4,32489	148,373
30,0061	4,47607	143,362
31,9988	4,62231	138,826
39,948	5,16463	124,249

- VOLTAJES: PLACA 1= 3200 V/ PLACA 2= 2600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,875088	147,479
2,0158	1,23756	528,548
14,0067	3,2622	200,512
15,9994	3,48654	187,61
17,0073	3,59468	181,966
18,0152	3,69966	176,803
28,0134	4,61344	141,783
30,0061	4,77471	136,995
31,9988	4,93071	132,66
39,948	5,50921	118,73

- VOLTAJES: PLACA 1= 3000 V/ PLACA 2= 2800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,946731	736,505
2,0158	1,33887	520,789
14,0067	3,52925	197,569
15,9994	3,77196	184,856
17,0073	3,88895	179,295
18,0152	4,00253	174,207
28,0134	4,99112	139,702
30,0061	5,16559	134,984
31,9988	5,33435	130,713
39,948	5,96022	116,987

- VOLTAJES: PLACA 1= 3200 V/ PLACA 2= 2800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,886057	754,328
2,0158	1,25307	533,392
14,0067	3,30309	202,35
15,9994	3,53024	189,33
17,0073	3,63973	183,634
18,0152	3,74604	178,423
28,0134	4,67127	143,083
30,0061	4,83456	138,25
31,9988	4,99251	133,876
39,948	5,57827	119,818

- VOLTAJES: PLACA 1= 3800 V/ PLACA 2= 2800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,798754	805,429
2,0158	1,12961	569,525
14,0067	2,97764	216,057
15,9994	3,18241	202,155
17,0073	3,28112	196,073
18,0152	3,37694	190,51
28,0134	4,21102	152,775
30,0061	4,35822	147,615
31,9988	4,5006	142,945
39,948	5,02865	127,935

- VOLTAJES: PLACA 1= 3400 V/ PLACA 2= 2800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,850198	771,742
2,0158	1,20236	545,704
14,0067	3,16941	207,021
15,9994	3,38737	193,7
17,0073	3,49243	187,873
18,0152	3,59443	182,542
28,0134	4,48222	146,386
30,0061	4,6389	141,442
31,9988	4,79046	136,967
39,948	5,35252	122,584

- VOLTAJES: PLACA 1= 3200 V/ PLACA 2= 3000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,921805	761,108
2,0158	1,30363	538,186
14,0067	3,43631	204,169
15,9994	3,67262	191,032
17,0073	3,78653	185,285
18,0152	3,89712	180,027
28,0134	4,85967	144,639
30,0061	5,02954	139,493
31,9988	5,19386	135,08
39,948	5,80325	120,895

- VOLTAJES: PLACA 1= 3600 V/ PLACA 2= 2800 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,822301	788,766
2,0158	1,16291	557,743
14,0067	3,06541	211,587
15,9994	3,27622	197,973
17,0073	3,37784	192,017
18,0152	3,47649	186,568
28,0134	4,33515	149,615
30,0061	4,48669	144,562
31,9988	4,63327	139,988
39,948	5,17689	125,288

- VOLTAJES: PLACA 1= 3400 V/ PLACA 2= 3000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,861671	778,361
2,0158	1,21858	550,388
14,0067	3,21216	208,798
15,9994	3,43306	195,363
17,0073	3,53954	189,486
18,0152	3,64291	184,109
28,0134	4,54267	147,642
30,0061	4,70147	142,655
31,9988	4,85507	139,142
39,948	5,4247	123,636

- VOLTAJES: PLACA 1= 3600 V/ PLACA 2= 3000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,8275	795,255
2,0158	1,17026	562,331
14,0067	3,0848	213,328
15,9994	3,29694	199,602
17,0073	3,3992	193,597
18,0152	3,49847	188,103
28,0134	4,36256	150,846
30,0061	4,51506	145,751
31,9988	4,66257	141,14
39,948	5,20962	126,319

- VOLTAJES: PLACA 1= 3400 V/ PLACA 2= 3200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,899899	784,944
2,0158	1,27265	555,04
14,0067	3,35468	210,562
15,9994	3,58538	197,014
17,0073	3,69658	191,087
18,0152	3,80454	185,665
28,0134	4,74423	148,89
30,0061	4,91007	143,861
31,9988	5,07049	139,31
39,948	5,6654	124,681

- VOLTAJES: PLACA 1= 3800 V/ PLACA 2= 3000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,801109	811,787
2,0158	1,13294	574,02
14,0067	2,98642	217,763
15,9994	3,19179	203,751
17,0073	3,29079	197,621
18,0152	3,3869	192,013
28,0134	4,22343	153,981
30,0061	4,37107	148,781
31,9988	4,51388	144,074
39,948	5,04348	128,945

- VOLTAJES: PLACA 1= 3600 V/ PLACA 2= 3200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,839378	801,692
2,0158	1,18706	566,882
14,0067	3,12908	215,055
15,9994	3,34426	201,217
17,0073	3,44799	195,164
18,0152	3,54869	189,626
28,0134	4,42518	152,067
30,0061	4,57987	146,93
31,9988	4,7295	142,282
39,948	5,2844	127,341

- VOLTAJES: PLACA 1= 4000 V/ PLACA 2= 3000 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,778895	827,986
2,0158	1,10152	585,476
14,0067	2,9036	222,109
15,9994	3,10328	207,817
17,0073	3,19953	201,565
18,0152	3,29297	195,846
28,0134	4,10631	157,054
30,0061	4,24985	151,75
31,9988	4,3887	146,949
39,948	4,90362	131,518

- VOLTAJES: PLACA 1= 3800 V/ PLACA 2= 3200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,806679	818,093
2,0158	1,14082	578,48
14,0067	3,00718	219,455
15,9994	3,21398	205,334
17,0073	3,31367	199,157
18,0152	3,41044	193,505
28,0134	4,25279	155,178
30,0061	4,40145	149,937
31,9988	4,54525	145,193
39,948	5,07854	129,947

- VOLTAJES: PLACA 1= 4000 V/ PLACA 2= 3200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,781605	834,169
2,0158	1,10535	589,847
14,0067	2,9137	233,767
15,9994	3,11408	209,369
17,0073	3,21067	203,07
18,0152	3,30443	197,308
28,0134	4,1206	158,227
30,0061	4,26464	152,883
31,9988	4,40397	148,046
39,948	4,92068	132,5

- VOLTAJES: PLACA 1= 3800 V/ PLACA 2= 3400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,818936	824,352
2,0158	1,15816	582,902
14,0067	3,05287	221,134
15,9994	3,26282	206,905
17,0073	3,36402	200,68
18,0152	3,46226	194,986
28,0134	4,31741	156,365
30,0061	4,46833	151,084
31,9988	4,61432	146,304
39,948	5,1557	130,941

- VOLTAJES: PLACA 1= 4200 V/ PLACA 2= 3200 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,760549	849,952
2,0158	1,07558	601,008
14,0067	2,83521	228,001
15,9994	3,03019	213,33
17,0073	3,12417	206,912
18,0152	3,21541	201,041
28,0134	4,00959	161,221
30,0061	4,14975	155,776
31,9988	4,28533	150,847
39,948	4,78812	135,007

- VOLTAJES: PLACA 1= 4000 V/ PLACA 2= 3400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,787495	840,306
2,0158	1,11368	594,187
14,0067	2,93566	225,413
15,9994	3,13754	210,909
17,0073	3,23486	204,564
18,0152	3,32934	198,759
28,0134	4,15165	159,391
30,0061	4,29678	154,008
31,9988	4,43716	149,135
39,948	4,95776	133,475

- VOLTAJES: PLACA 1= 3600 V/ PLACA 2= 3400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,881234	808,072
2,0158	1,24622	571,396
14,0067	3,28503	216,767
15,9994	3,51094	202,819
17,0073	3,61983	196,718
18,0152	3,72555	191,136
28,0134	4,64573	153,278
30,0061	4,80813	148,101
31,9988	4,96521	143,415
39,948	5,54777	128,355

- VOLTAJES: PLACA 1= 4200 V/ PLACA 2= 3400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,763566	855,969
2,0158	1,07984	650,262
14,0067	2,84645	229,616
15,9994	3,0422	214,841
17,0073	3,13656	208,378
18,0152	3,22816	202,465
28,0134	4,02549	162,363
30,0061	4,1662	156,879
31,9988	4,30232	151,916
39,948	4,8071	135,963

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4400 V/ PLACA 2= 3400 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,743541	871,358
2,0158	1,05152	616,144
14,0067	2,77181	233,743
15,9994	2,96242	218,703
17,0073	3,05431	212,124
18,0152	3,14351	206,104
28,0134	3,91993	165,281
30,0061	4,05696	159,699
31,9988	4,1895	154,646
39,948	4,68105	138,407

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4200 V/ PLACA 2= 3600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,769728	861,956
2,0158	1,08856	609,496
14,0067	2,86943	231,221
15,9994	3,06676	216,343
17,0073	3,16188	209,835
18,0152	3,25422	203,88
28,0134	4,05798	163,498
30,0061	4,19983	157,976
31,9988	4,33705	152,978
39,948	4,84591	136,914

- **VOLTAJES: PLACA 1= 3800 V/ PLACA 2= 3600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,867599	830,56
2,0158	1,22697	587,295
14,0067	3,23428	222,799
15,9994	3,4567	208,463
17,0073	3,56391	202,192
18,0152	3,668	196,454
28,0134	4,57396	157,543
30,0061	4,73385	152,221
31,9988	4,88851	147,406
39,948	5,46207	131,927

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4400 V/ PLACA 2= 3600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,746814	877,236
2,0158	1,05615	620,301
14,0067	2,78401	235,32
15,9994	2,97546	220,178
17,0073	3,06775	213,555
18,0152	3,15735	207,495
28,0134	3,93718	166,396
30,0061	4,07481	160,776
31,9988	4,20794	155,69
39,948	4,70165	139,341

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4000 V/ PLACA 2= 3600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,800101	846,402
2,0158	1,13151	598,497
14,0067	2,98265	227,048
15,9994	3,18777	212,439
17,0073	3,28664	206,048
18,0152	3,38263	200,201
28,0134	4,21811	160,547
30,0061	4,36556	155,125
31,9988	4,50819	150,217
39,948	5,03712	134,443

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4600 V/ PLACA 2= 3600 V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,727713	892,25
2,0158	1,02914	630,917
14,0067	2,7128	239,348
15,9994	2,89935	223,947
17,0073	2,98928	217,21
18,0152	3,07659	211,046
28,0134	3,83648	169,244
30,0061	3,97059	163,528
31,9988	4,10031	158,354
39,948	4,58139	141,726

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4000 V/ PLACA 2= 3800 V\***
- **VOLTAJES: PLACA 1= 4200 V/ PLACA 2= 3800V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,782664	867,901
2,0158	1,10685	613,7
14,0067	2,91766	232,815
15,9994	3,1183	217,835
17,0073	3,21502	211,282
18,0152	3,30891	205,286
28,0134	4,12619	164,625
30,0061	4,27042	159,065
31,9988	4,40994	154,033
39,948	4,92735	137,858

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4400 V/ PLACA 2= 3800V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,753226	883,074
2,0158	1,06522	624,428
14,0067	2,80791	236,886
15,9994	3,00101	221,644
17,0073	3,09409	214,976
18,0152	3,18445	208,875
28,0134	3,97099	167,504
30,0061	4,10979	161,846
31,9988	4,24407	156,726
39,948	4,74201	140,268

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4600 V/ PLACA 2= 3800V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,731215	897,993
2,0158	1,03409	634,978
14,0067	2,72586	240,888
15,9994	2,91331	225,388
17,0073	3,00367	218,608
18,0152	3,0914	212,404
28,0134	3,85494	170,334
30,0061	3,9897	164,58
31,9988	4,12004	159,374
39,948	4,60344	142,638

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4800 V/ PLACA 2= 3800V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,712931	912,665
2,0158	1,00824	645,353
14,0067	2,6577	244,824
15,9994	2,84046	229,071
17,0073	2,92857	222,179
18,0152	3,0141	215,875
28,0134	3,75855	173,117
30,0061	3,88993	167,27
31,9988	4,01702	161,978
39,948	4,48833	144,969

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4200 V/ PLACA 2= 4000V\***

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4400 V/ PLACA 2= 4000V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,766484	888,873
2,0158	1,08397	628,529
14,0067	2,85735	238,441
15,9994	3,05384	223,098
17,0073	3,14856	216,387
18,0152	3,24052	210,246
28,0134	4,0409	168,603
30,0061	4,18215	162,908
31,9988	4,31879	157,754
39,948	4,8255	141,184

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4600 V/ PLACA 2= 4000V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,737849	903,693
2,0158	1,04347	639,008
14,0067	2,275058	242,417
15,9994	2,93974	226,819
17,0073	3,03092	219,995
18,0152	3,11944	213,753
28,0134	3,88992	171,414
30,0061	4,0259	165,625
31,9988	4,15742	160,385
39,948	4,6452	143,543

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4800 V/ PLACA 2= 4000V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,716637	918,28
2,0158	1,01348	649,323
14,0067	2,67151	246,33
15,9994	2,85523	230,48
17,0073	2,94379	223,546
18,0152	3,02976	217,203
28,0134	3,77809	174,182
30,0061	3,91016	168,299
31,9988	4,03791	162,974
39,948	4,51166	145,681

- **VOLTAJES: PLACA 1= 5000 V/ PLACA 2= 4000V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,699089	932,628
2,0158	0,98866	659,469
14,0067	2,6061	250,179
15,9994	2,78532	234,081
17,0073	2,87171	227,039
18,0152	2,95558	220,597
28,0134	3,68558	176,903
30,0061	3,81441	170,928
31,9988	3,93903	165,521
39,948	4,40119	148,14

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4400 V/ PLACA 2= 4200V\***
- **VOLTAJES: PLACA 1= 4600 V/ PLACA 2= 4200V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,751415	909,363
2,0158	1,06266	643,017
14,0067	2,8012	243,938
15,9994	2,99379	228,242
17,0073	3,08665	221,376
18,0152	3,1768	215,094
28,0134	3,96144	172,49
30,0061	4,09991	166,664
31,9988	4,23386	161,391
39,948	4,73061	144,444

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4800 V/ PLACA 2= 4200V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,723464	932,859
2,0158	1,02313	653,268
14,0067	2,69696	247,827
15,9994	2,88243	231,88
17,0073	2,97183	224,904
18,0152	3,05862	218,523
28,0134	3,81408	175,24
30,0061	3,9474	169,321
31,9988	4,07636	163,964
39,948	4,55464	146,747

- **VOLTAJES: PLACA 1= 5000 V/ PLACA 2= 4200V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,702972	938,129
2,0158	0,994153	663,358
14,0067	2,62057	251,655
15,9994	2,80079	235,462
17,0073	2,88766	228,378
18,0152	2,97199	221,898
28,0134	3,70605	177,947
30,0061	3,8356	171,936
31,9988	3,96091	166,497
39,948	4,42564	149,013

- **VOLTAJES: PLACA 1= 4600 V/ PLACA 2= 4400V\***
- **VOLTAJES: PLACA 1= 4800 V/ PLACA 2= 4400V**

MASA IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,737349	929,402
2,0158	1,04276	657,188
14,0067	2,74782	249,313
15,9994	2,93774	233,272
17,0073	3,02886	226,254
18,0152	3,11732	219,834
28,0134	3,88727	176,291
30,0061	4,02315	170,337
31,9988	4,15459	164,948
39,948	4,64205	147,627

- **VOLTAJES: PLACA 1= 5000 V/ PLACA 2= 4400V**

MASAS IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,709981	943,187
2,0158	1,00407	667,212
14,0067	2,64671	253,118
15,9994	2,82871	236,832
17,0073	2,91646	229,707
18,0152	3,00163	223,188
28,0134	3,743	178,982
30,0061	3,87384	172,937
31,9988	4,0004	167,466
39,948	4,46977	149,88

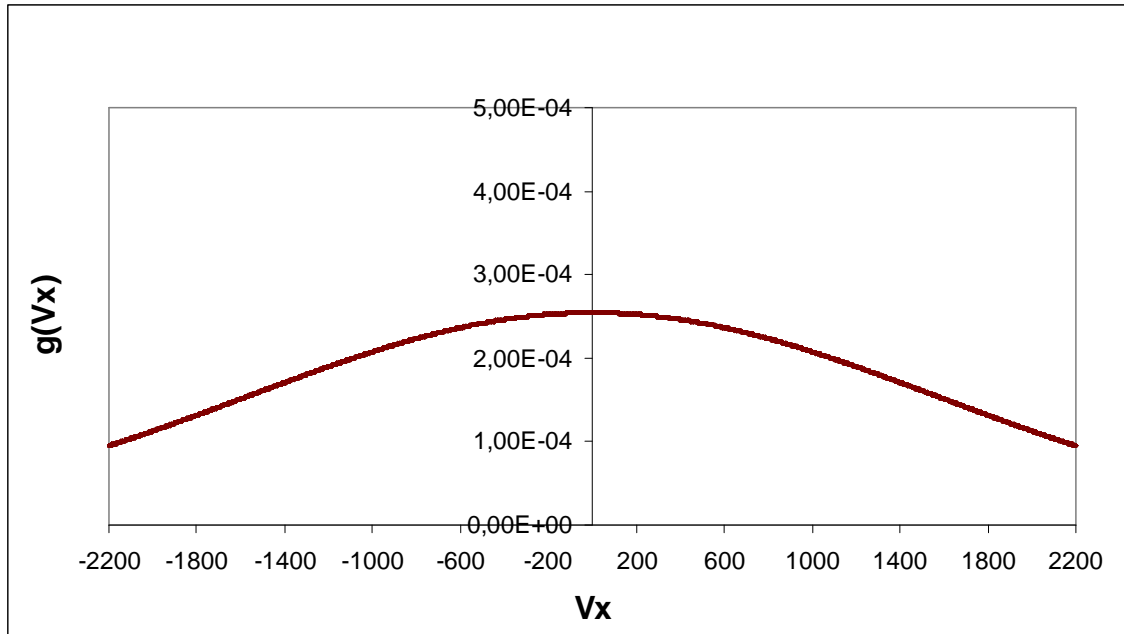
- **VOLTAJES: PLACA 1= 4800 V/ PLACA 2= 4600V\***
- **VOLTAJES: PLACA 1= 5000 V/ PLACA 2= 4600V**

MASAS IONES (UMA)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	0,724178	949,023
2,0158	1,02415	671,056
14,0067	2,69966	254,575
15,9994	2,88531	238,194
17,0073	2,97481	231,029
18,0152	3,06168	224,473
28,0134	3,8179	180,012
30,0061	3,95135	173,932
31,9988	4,08044	168,429
39,948	4,5592	150,743

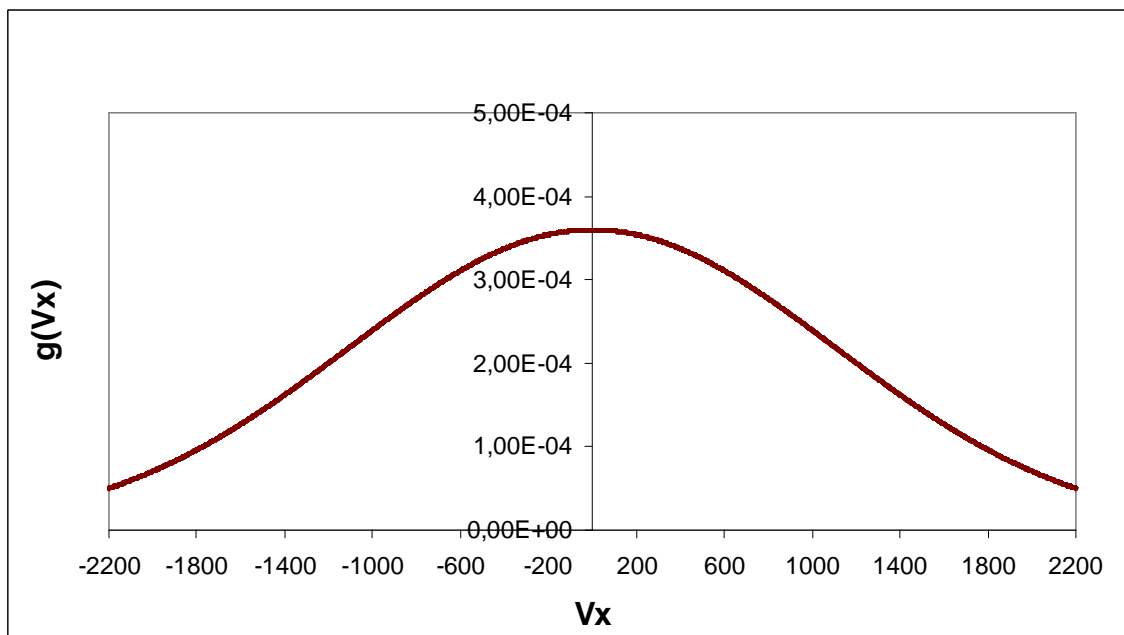
- **VOLTAJES: PLACA 1= 5000 V/ PLACA 2= 4800V\***

**Anexo C.** Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann para los iones de estudio a 298 K.

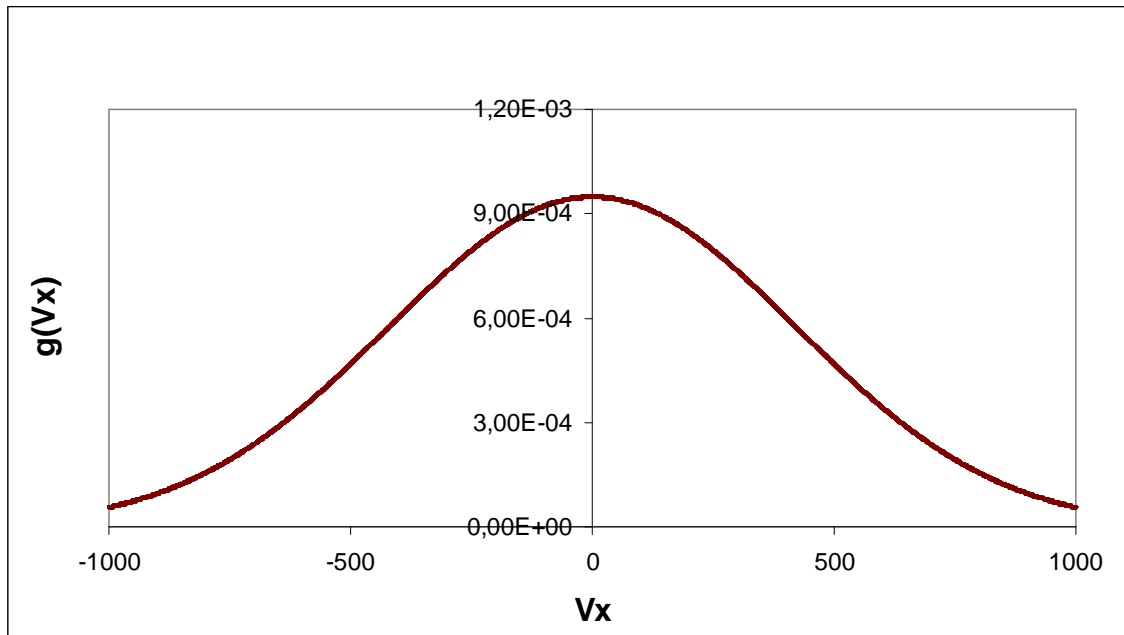
- ion  $H^+$



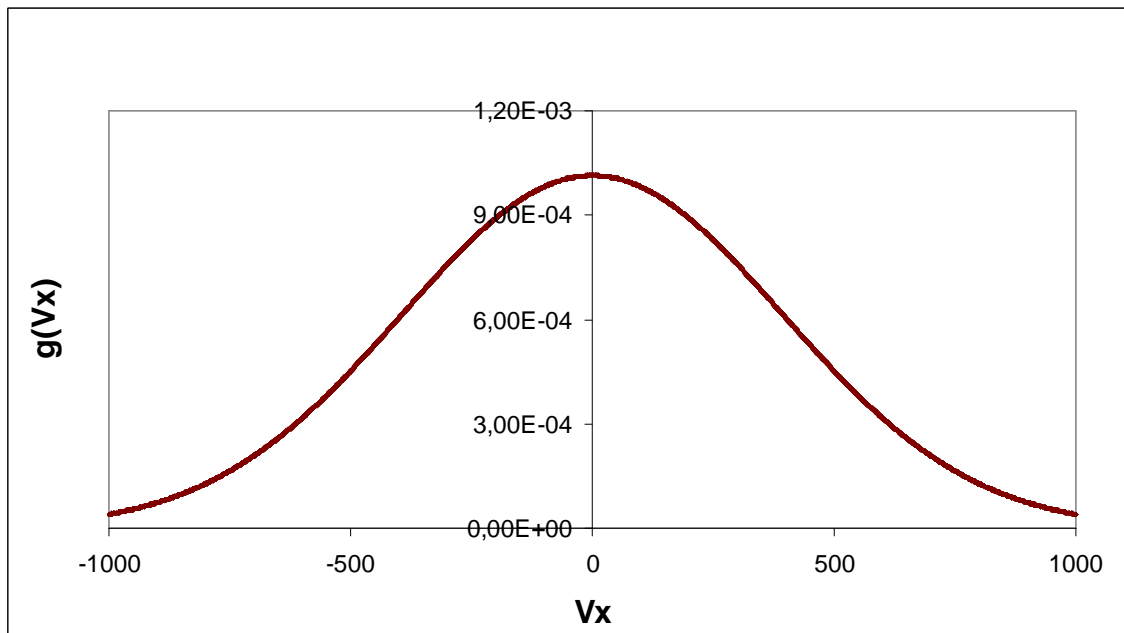
- ion  $H_2^+$



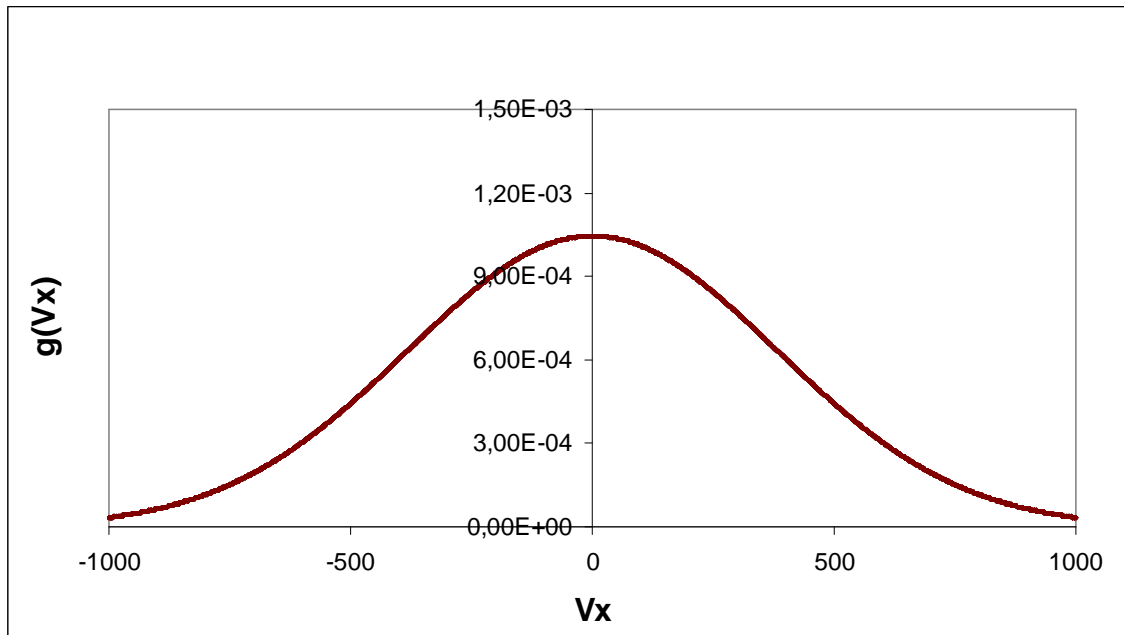
- ion  $N^+$



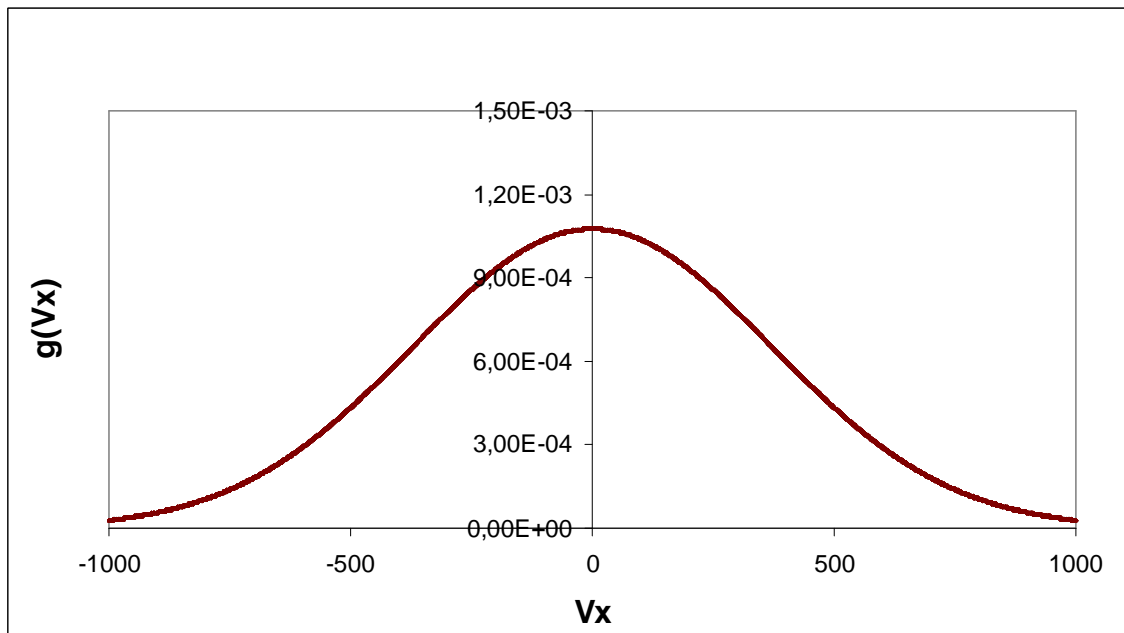
- ion  $O^+$



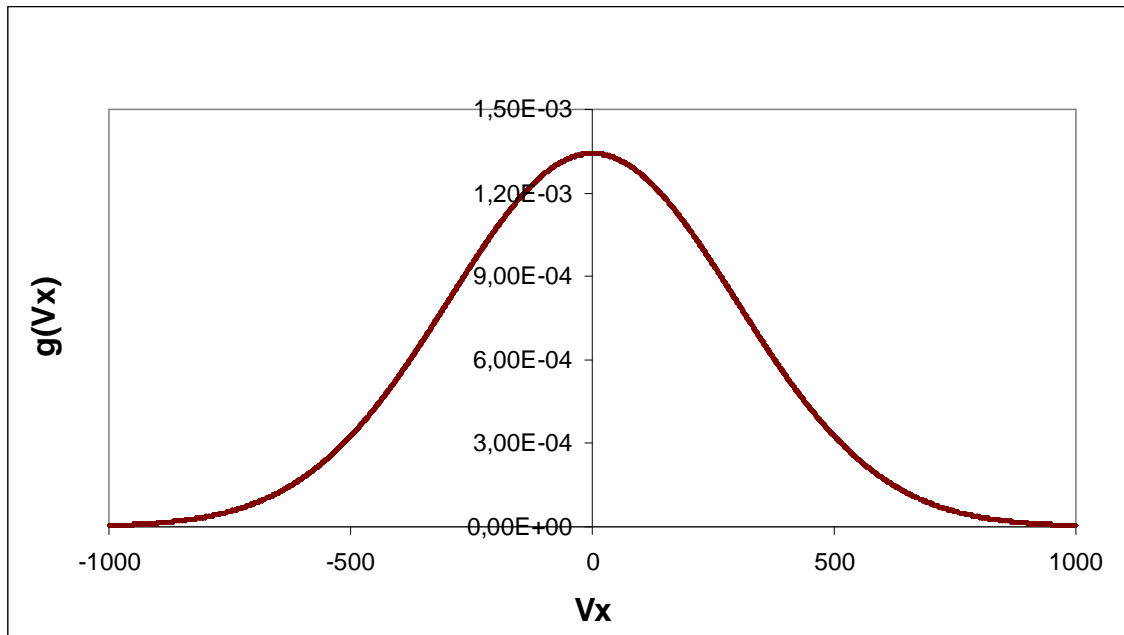
- ion  $\text{OH}^+$



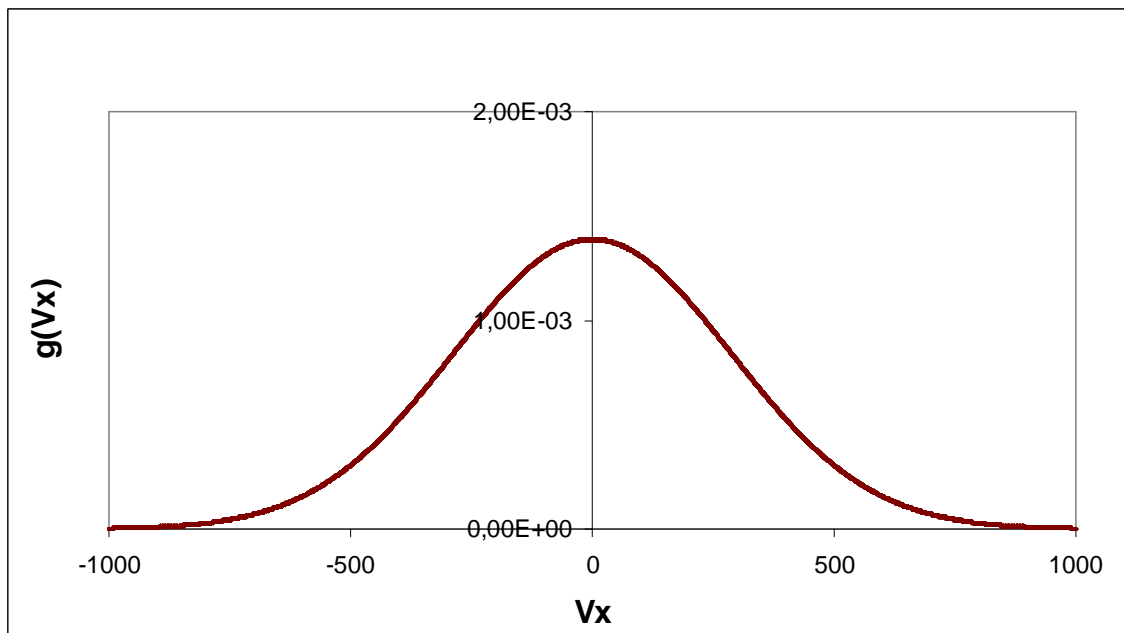
- ion  $\text{H}_2\text{O}^+$



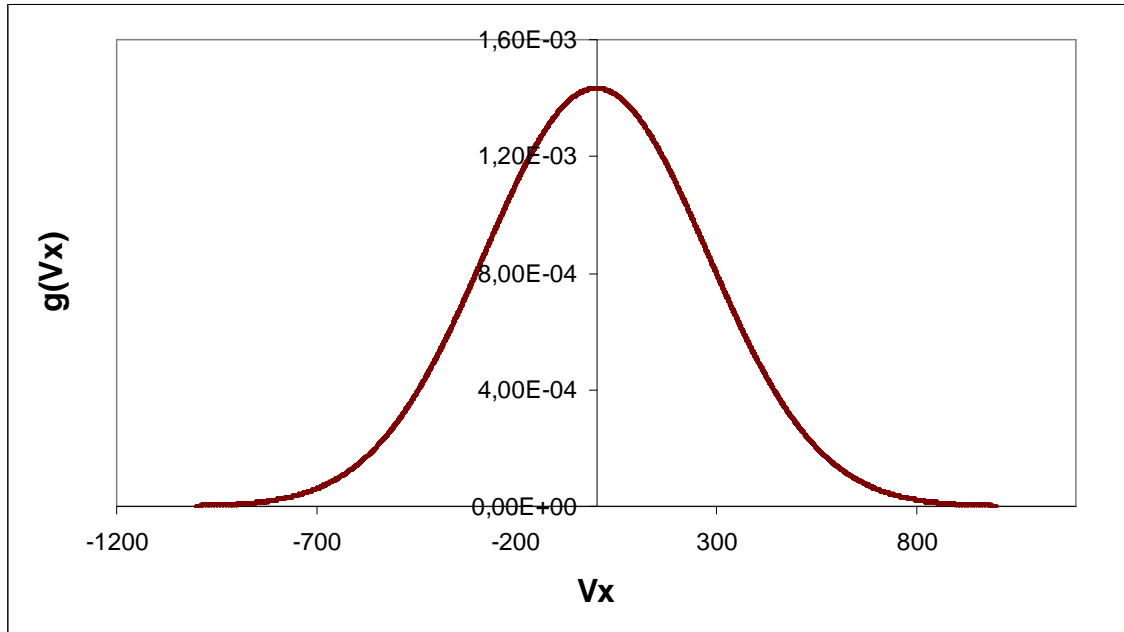
- ion  $N_2^+$



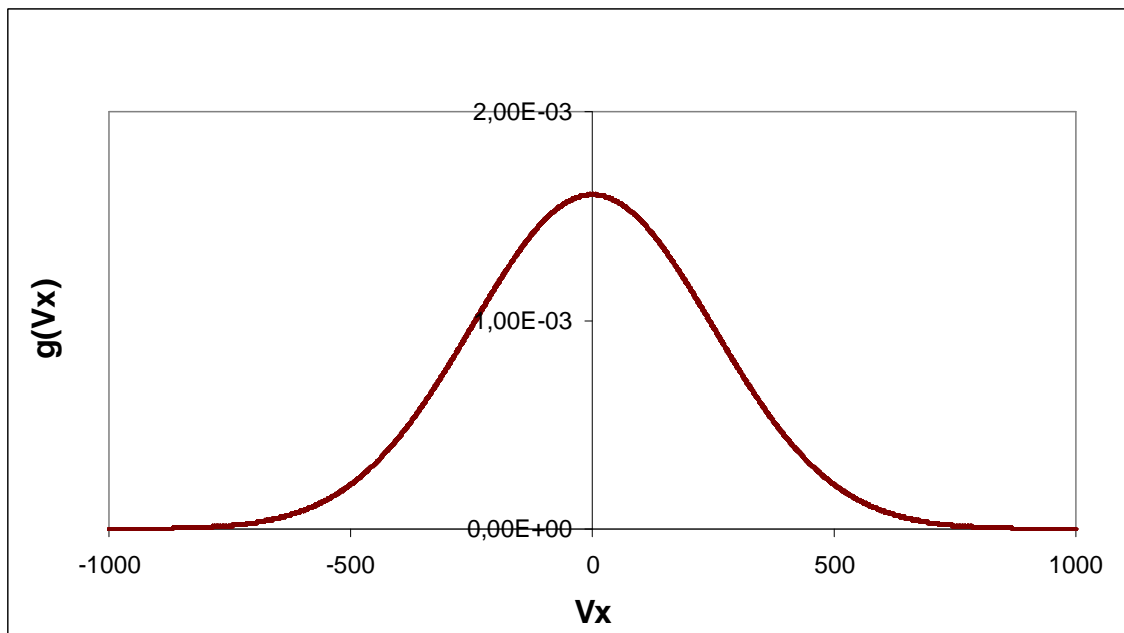
- ion  $NO^+$



- ion  $O_2^+$



- ion  $Ar^+$



**Anexo D.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de 500,700 y 900 umas, a diferentes valores de potencial.

- Voltajes:  $800 \text{ V} \leq \text{placa } 1 \leq 1400 \text{ V}$  con  $\Delta V = 200 \text{ V}$  y placa 2 = 400 V.
- Voltajes:  $1000 \text{ V} \leq \text{placa } 1 \leq 1800 \text{ V}$  con  $\Delta V = 200 \text{ V}$  y placa 2 = 800 V.

placa 1=800 V / placa 2=400 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	39,0828	15,989
700	46,2434	13,513
900	52,4351	11,918
placa 1=1000V / placa 2 = 400V		
500	35,3159	17,555
700	41,7863	14,837
900	47,3812	13,085
placa 1=1200 V / placa 2= 400V		
500	32,3532	19,079
700	38,2808	16,124
900	43,4063	14,22
placa1=1400 V / placa 2=400 V		
500	30,1598	20,405
700	35,6855	17,245
900	40,4636	15,209

- Voltajes:  $800 \text{ V} \leq \text{placa } 1 \leq 1600 \text{ V}$  con  $\Delta V = 200 \text{ V}$  y placa 2 = 600 V.

placa 1 =800 V / placa 2 = 600 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	38,7917	16,625
700	45,889	14,051
900	52,0446	12,392
placa 1=1000 V/placa 2=600 V		
500	34,6783	18,199
700	41,032	15,381
900	46,5259	13,565
placa 1=1200 V/placa 2=600 V		
500	31,911	19,583
700	37,7576	16,551
900	42,8131	14,596
placa 1=1400 V / placa 2=600 V		
500	29,7412	20,89
700	35,1902	17,655
900	39,902	15,57
placa 1=1600 V / placa 2=600 V		
500	27,8817	22,2
700	32,9901	18,762
900	37,4073	16,547

placa 1=1000 V / placa 2=800 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	34,8171	18,726
700	41,1961	15,826
900	46,712	13,958
placa 1=1200 V / placa 2=800 V		
500	31,6474	20,106
700	37,4457	16,993
900	42,4594	14,986
placa 1=1400 V / placa 2= 800 V		
500	29,4264	21,38
700	34,8177	18,069
900	39,4796	15,936
placa 1=1600 V / placa 2= 800 V		
500	27,6357	22,612
700	32,699	19,111
900	37,0772	16,854
placa 1= 1800 V / placa 2= 800 V		
500	26,1827	23,758
700	30,9798	20,079
900	35,1278	17,708

- Voltajes:  $1200\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 2000\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 1000 V.

placa 1= 1200 V / placa 2= 1000 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	31,923	20,614
700	37,7719	17,422
900	42,8293	15,365
placa 1= 1400 V / placa 2= 1000 V		
500	29,2962	21,875
700	34,6637	18,488
900	39,305	16,305
placa 1= 1600 V / placa 2= 1000 V		
500	27,411	23,09
700	32,4331	19,515
900	36,7757	17,21
placa 1= 1800 V / placa 2= 1000 V		
500	25,9629	24,194
700	30,7197	20,447
900	34,8328	18,033
placa 1= 2000 V / placa 2= 1000 V		
500	24,7181	25,281
700	29,2469	21,367
900	33,1629	18,844

- Voltajes:  $1400\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 2200\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 1200 V.

placa 1= 1400V / placa 2= 1200 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	29,6943	22,343
700	35,1348	18,884
900	39,8391	16,654
placa 1=1600 V / placa 2= 1200 V		
500	27,4299	23,511
700	32,4555	19,871
900	36,8011	17,524
placa 1=1800 V / placa 2= 1200 V		
500	25,84	24,624
700	30,5743	20,811
900	34,668	18,354
placa 1= 2000 V / placa 2= 1200 V		
500	24,5213	25,737
700	29,014	21,752
900	32,8988	19,183
placa 1= 2200 V / placa 2= 1200 V		
500	23,4941	26,71
700	27,7986	22,574
900	31,5207	19,908

- Voltajes:  $1600\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 2400\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 1400 V.

placa 1= 1600V / placa 2 = 1400 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	27,9095	23,948
700	33,0229	20,24
900	37,4445	17,85
placa 1= 1800 V / placa 2= 1400 V		
500	25,9013	25,041
700	30,6468	21,164
900	34,7502	18,665
placa 1= 2000 V / placa 2= 1400 V		
500	24,4914	26,107
700	28,9786	22,064
900	32,8587	19,459
placa 1= 2200 V / placa 2= 1400 V		
500	23,3812	27,107
700	27,665	22,909
900	31,3691	20,204
placa 1= 2400 V / placa 2= 1400 V		
500	22,4718	28,031
700	26,589	23,691
900	30,1491	20,893

- Voltajes:  $1800\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 2600\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 1600 V.

placa 1= 1800 V / placa 2= 1600 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	26,4392	25,452
700	31,2833	21,511
900	35,4719	18,971
placa 1= 2000 V / placa 2= 1600 V		
500	24,6194	26,483
700	29,1301	22,382
900	33,0304	19,739
placa 1= 2200 V / placa 2= 1600 V		
500	23,3755	27,475
700	27,6583	23,221
900	31,3615	20,479
placa 1= 2400 V / placa 2= 1600 V		
500	22,3781	28,434
700	26,4781	24,031
900	30,0233	21,193
placa 1= 2600 V / placa 2= 1600 V		
500	21,5025	29,402
700	25,4451	24,849
900	28,8486	21,915

- Voltajes: 2000 V ≤ placa 1 ≤ 2800 V con ΔV=200 V y placa 2 = 1800 V.

placa 1= 2000 V / placa 2= 1800 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	25,202	26,871
700	29,8194	22,71
900	33,812	20,029
placa 1= 2200 V / placa 2= 1800 V		
500	23,5235	27,85
700	27,8334	23,538
900	31,5601	20,7582
placa 1= 2400 V / placa 2= 1800 V		
500	22,3964	28,795
700	26,4998	24,337
900	30,048	21,463
placa 1= 2600 V / placa 2= 1800 V		
500	21,4623	29,757
700	25,3945	25,149
900	28,7947	22,18
placa 1= 2800 V / placa 2= 1800 V		
500	20,7299	30,598
700	24,5279	25,86
900	27,8121	22,807

- Voltajes: 2200 V ≤ placa 1 ≤ 3000 V con ΔV=200 V y placa 2 = 2000 V

placa 1= 2200 V / placa 2= 2000 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	24,1432	28,219
700	28,5666	23,85
900	32,3915	21,034
placa 1= 2400 V / placa 2= 2000 V		
500	22,573	29,153
700	26,7087	24,639
900	30,2849	21,729
placa 1= 2600 V / placa 2= 2000 V		
500	21,5389	30,058
700	25,4852	25,403
900	28,8975	22,404
placa 1= 2800 V / placa 2= 2000 V		
500	20,7155	30,936
700	24,5109	26,145
900	27,7928	23,058
placa 1= 3000 V / placa 2= 2000 V		
500	20,0156	31,79
700	23,6827	26,868
900	26,8537	23,695

- Voltajes: 2400 V ≤ placa 1 ≤ 3200 V con ΔV=200 V y placa 2 = 2200 V.

placa 1= 2400 V / placa 2= 2200 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	23,2253	29,506
700	27,4806	24,937
900	31,16	21,993
placa 1= 2600 V / placa 2= 2200 V		
500	21,7382	30,4
700	25,7209	25,693
900	29,1648	22,659
placa 1= 2800 V / placa 2= 2200 V		
500	20,7798	31,269
700	24,587	26,427
900	27,8791	23,306
placa 1= 3000 V / placa 2= 2200 V		
500	20,0206	32,114
700	23,6887	27,141
900	26,8604	23,9362
placa 1= 3200 V / placa 2= 2200 V		
500	19,3817	32,927
700	22,9327	27,829
900	26,0032	24,542

- Voltajes: 2600 V ≤ placa 1 ≤ 3400 V con ΔV=200 V y placa 2 = 2400 V.

placa 1= 2600 V / placa 2= 2400 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	22,422	30,739
700	26,5301	25,979
900	30,0823	22,912
placa 1= 2800 V / placa 2= 2400 V		
500	20,997	31,598
700	24,844	26,705
900	28,1705	23,552
placa 1= 3000 V / placa 2= 2400 V		
500	20,1017	32,4347
700	23,7846	27,412
900	26,9692	24,175
placa 1= 3200 V / placa 2= 2400 V		
500	19,3959	33,25
700	22,9495	28,101
900	26,0223	24,783
placa 1= 3400 V / placa 2= 2400 V		
500	18,7984	34,044
700	22,2426	28,773
900	25,2208	25,375

- Voltajes:  $2800\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 3600\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 2600 V.

placa 1= 2800 V / placa 2= 2600 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	21,7134	31,925
700	25,6916	26,981
900	29,1316	23,795
placa 1= 3000/ placa 2 =2600 V		
500	20,3334	32,753
700	24,0588	27,681
900	27,2801	24,413
placa 1= 3200 V/ placa 2= 2600 V		
500	19,4907	33,56
700	23,0617	28,363
900	26,1495	25,014
placa 1= 3400 V/ placa 2 = 2600 V		
500	18,8302	34,349
700	22,2801	29,03
900	25,2633	25,602
placa 1= 3600 V / placa 2 = 2600 V		
500	18,2716	35,12
700	21,6193	29,682
900	24,5139	26,177

- Voltajes:  $3000\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 3800\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 2800 V.

placa 1= 3000 V / placa 2= 2800 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	21,0863	33,067
700	24,9496	27,947
900	28,2902	24,647
placa 1 = 3200 V/ placa 2= 2800 V		
500	19,735	33,868
700	23,3507	28,623
900	26,4773	25,243
placa 1= 3400 V / placa 2= 2800 V		
500	18,9363	34,649
700	22,4058	29,284
900	25,4057	25,826
placa 1 = 3600 V / placa 2= 2800 V		
500	18,315	35,414
700	21,6706	29,93
900	24,5721	26,396
placa 1 = 3800 V / placa 2 = 2800 V		
500	17,7905	36,162
700	21,05	30,562
900	23,8685	26,954

- Voltajes:  $3200\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 4000\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 3000 V.

placa 1= 3200 V / placa 2= 3000 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	20,5309	34,172
700	24,2925	28,881
900	27,5451	25,47
placa 1 = 3400 V/ placa 2= 3000 V		
500	19,1917	34,947
700	22,7079	29,536
900	25,7484	26,048
placa 1= 3600 V / placa 2= 3000 V		
500	18,4308	35,705
700	21,8076	30,176
900	24,7275	26,613
placa 1 = 3800 V / placa 2= 3000 V		
500	17,843	36,447
700	21,1121	30,804
900	23,9389	27,166
placa 1 = 4000 V / placa 2 = 3000 V		
500	17,3482	37,175
700	20,5267	31,418
900	23,275	27,708

- Voltajes:  $3400\text{ V} \leq \text{placa 1} \leq 4200\text{ V}$  con  $\Delta V=200\text{ V}$  y placa 2 = 3200 V.

placa 1= 3400 V / placa 2= 3200 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	20,0433	35,242
700	23,7155	29,785
900	26,8909	26,268
placa 1 = 3600 V/ placa 2= 3200 V		
500	18,6953	35,994
700	22,1206	30,421
900	25,0824	26,828
placa 1= 3800 V / placa 2= 3200 V		
500	17,967	36,731
700	21,2589	31,043
900	24,1053	27,377
placa 1 = 4000 V / placa 2= 3200 V		
500	17,4085	37,452
700	20,5981	31,653
900	23,356	27,915
placa 1 = 4200 V / placa 2 = 3200 V		
500	16,9396	38,161
700	20,0432	32,252
900	22,7268	28,444

- Voltajes: 3600 V ≤ placa 1 ≤ 4400 V con ΔV=200 V y placa 2 = 3400 V

placa 1= 3600 V / placa 2= 3400 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	26,3325	36,281
700	23,2231	30,663
900	26,3325	27,042
placa 1 = 3800 V / placa 2= 3400 V		
500	18,24	37,012
700	21,5819	31,28
900	24,4716	27,587
placa 1= 4000 V / placa 2= 3400 V		
500	17,5397	37,728
700	20,7533	31,886
900	23,532	28,121
placa 1 = 4200 V / placa 2= 3400 V		
500	17,0067	38,431
700	20,1226	32,48
900	22,8169	28,645
placa 1 = 4400 V / placa 2 = 3400 V		
500	16,5608	39,122
700	19,595	33,064
900	22,2186	29,16

- Voltajes: 3800 V ≤ placa 1 ≤ 4600 V con ΔV=200 V y placa 2 = 3600 V

placa 1= 3800 V / placa 2= 3600 V	TOF (usec)	V (mm/usec)
500	19,3239	37,29
700	22,8643	31,516
900	25,9257	27,795
placa 1 = 4000 V / placa 2= 3600 V		
500	17,8205	38,002
700	21,0855	32,117
900	23,9087	28,325
placa 1= 4200 V / placa 2= 3600 V		
500	17,144	38,7
700	20,2851	32,707
900	23,0011	28,8452
placa 1 = 4400 V / placa 2= 3600 V		
500	16,6337	39,386
700	19,6812	33,287
900	22,3164	29,357
placa 1 = 4600 V / placa 2 = 3600 V		
500	16,2082	40,06
700	19,1778	33,857
900	21,7456	29,859

- Voltajes: 4000 V ≤ placa 1 ≤ 4800 V con ΔV=200 V y placa 2 = 3800 V

placa 1= 4000 V / placa 2= 3800 V*	TOF (usec)	V (mm/usec)
placa 1 = 4200 V / placa 2= 3800 V		
500	17,4321	38,967
700	20,626	32,933
900	23,3877	29,044
placa 1= 4400 V / placa 2= 3800 V		
500	16,7765	39,648
700	19,8502	33,509
900	22,508	29,552
placa 1 = 4600 V / placa 2= 3800 V		
500	16,2862	40,318
700	19,2701	34,075
900	21,8502	30,051
placa 1 = 4800 V / placa 2 = 3800 V		
500	15,879	40,977
700	18,7883	34,632
900	21,3039	30,542

- Voltajes: 4200 V ≤ placa 1 ≤ 5000 V con ΔV=200 V y placa 2 = 4000 V

placa 1= 4400 V / placa 2= 4000 V*	TOF (usec)	V (mm/usec)
placa 1 = 4400 V / placa 2= 4000 V		
500	17,0718	39,908
700	20,1997	33,729
900	22,9043	29,746
placa 1 = 4600 V / placa 2= 4000 V		
500	16,434	40,574
700	19,445	34,291
900	22,0485	30,242
placa 1 = 4800 V / placa 2= 4000 V		
500	15,9615	41,229
700	18,8859	34,845
900	21,4146	30,73
placa 1 = 5000 V / placa 2 = 4000 V		
500	15,5707	41,873
700	18,4235	35,389
900	20,8903	31,21

- Voltajes: 4400 V ≤ placa 1 ≤ 5000 V con  $\Delta V=200$  V y placa 2 = 4200 V

placa 1= 4400 V / placa 2= 4200 V*	TOF (usec)	V (mm/usec)
placa 1 = 4600 V/ placa 2= 4200 V		
500	16,7361	40,828
700	19,8024	34,506
900	22,4539	30,432
placa 1= 4800 V / placa 2= 4200 V		
500	16,1135	41,479
700	19,0658	35,056
900	21,6186	30,917
placa 1 = 5000 V / placa 2= 4200 V		
500	15,6572	42,12
700	18,5258	35,598
900	21,0063	31,394

- Voltajes: placa 1= 5000 V y placa 2 = 4800 V\*

- Voltajes: 4600 V ≤ placa 1 ≤ 5000 V con  $\Delta V=200$  V y placa 2 = 4400 V

placa 1= 4600 V / placa 2= 4400 V*	TOF (usec)	V (mm/usec)
placa 1 = 4800 V/ placa 2= 4400 V		
500	16,4228	41,728
700	19,4317	35,267
900	22,0335	31,102
placa 1= 5000 V / placa 2= 4400 V		
500	15,8133	42,365
700	18,7105	35,805
900	21,2157	31,577

- Voltajes: 4800 V ≤ placa 1 ≤ 5000 V con  $\Delta V=200$  V y placa 2 = 4600 V

placa 1= 4800 V / placa 2= 4600 V*	TOF (usec)	V (mm/usec)
placa 1 = 5000 V/ placa 2= 4600 V		
500	16,1297	42,609
700	19,0849	36,011
900	21,6403	31,759

**Anexo E.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio, con una distribución espacial inicial para un volumen grande de ionización.

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,61641	391,391
	1,62944	387,707
	1,64281	384,016
	1,65645	380,337
	1,67076	376,576
	1,68538	372,825
	1,70023	369,096
	1,71576	365,297
	1,73136	361,559
	1,7475	357,789
	1,76409	354
	1,7809	350,248
	1,79779	346,552
	1,81532	342,81
	1,83295	339,123
	1,85099	335,434
	1,8691	331,801
	1,88728	328,226
	1,906	324,622
	1,92477	321,076
	1,9436	317,582
	1,96266	314,113
	1,98191	310,67
	2,00141	307,246
	2,02101	303,861
	2,04086	300,496
	2,06089	297
	2,08132	293,811
	2,10208	290,472
	2,12328	287,13

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
2,0158	2,28594	276,755
	2,30437	274,15
	2,32329	271,541
	2,34258	268,939
	2,36282	266,28
	2,38348	263,627
	2,40449	260,99
	2,42645	258,304
	2,44851	255,661
	2,47134	252,995
	2,49479	250,316
	2,51857	247,663
	2,54246	245,05
	2,56726	242,403
	2,59218	239,797
	2,61769	237,188
	2,64331	234,619
	2,66901	232,091
	2,6955	229,542
	2,72204	227,035
	2,74867	224,565
	2,7562	222,111
	2,80284	219,677
	2,83043	217,256
	2,85814	214,862
	2,88621	212,483
	2,91453	210,119
	2,94343	207,756
	2,97279	205,394
	3,00278	203,032

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
14,0067	6,02572	104,991
	6,07431	104,003
	6,12417	103,013
	6,17502	102,026
	6,22837	101,017
	6,28284	100,011
	6,33821	99,0103
	6,3961	97,9913
	6,45426	96,9886
	6,51442	95,9772
	6,57625	94,9609
	6,63893	93,9542
	6,70191	92,9629
	6,76727	91,959
	6,83297	90,9701
	6,90021	89,9804
	6,96774	89,0059
	7,03549	88,0469
	7,10531	87,0801
	7,17528	86,1288
	7,24547	85,1917
	7,3165	84,261
	7,38827	83,3374
	7,46098	82,419
	7,53404	81,5109
	7,60804	80,6082
	7,68269	79,7116
	7,75886	78,815
	7,83625	77,9192
	7,9153	77,0229

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
15,9994	6,44011	98,2354
	6,49203	97,3107
	6,54532	96,3844
	6,59967	95,4609
	6,65669	94,517
	6,7149	93,5756
	6,77409	92,6395
	6,83596	91,6861
	6,89812	90,7479
	6,96242	89,8016
	7,0285	88,8507
	7,09548	87,9088
	7,1628	86,9813
	7,23265	86,042
	7,30286	85,1167
	7,37473	84,1906
	7,44691	83,2788
	7,51932	82,3816
	7,59393	81,477
	7,66872	80,5869
	7,74374	79,7101
	7,81965	78,8393
	7,89636	77,9751
	7,97407	77,1158
	8,05215	76,2662
	8,13124	75,4215
	8,21102	74,5826
	8,29243	73,7437
	8,37515	72,9056
	8,45963	72,0669

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
17,0073	6,63986	95,2801
	6,69339	94,3832
	6,74834	93,4848
	6,80438	92,5891
	6,86316	91,6735
	6,92318	90,7604
	6,9842	89,8526
	7,04799	88,9278
	7,11208	88,0179
	7,17837	87,1
	7,2465	86,1777
	7,31556	85,2642
	7,38497	84,3646
	7,45698	83,4535
	7,52938	82,5561
	7,60348	81,6579
	7,67789	80,7735
	7,75255	79,9032
	7,82947	79,0258
	7,90658	78,1626
	7,98392	77,3121
	8,0622	76,4675
	8,14128	75,6293
	8,2214	74,7958
	8,3019	73,9718
	8,38345	73,1525
	8,4657	72,3389
	8,54963	71,5252
	8,63492	70,7123
	8,72202	69,8988

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>18,0152</b>	6,83378	92,5764
	6,88887	91,705
	6,94542	90,832
	7,0031	89,9618
	7,06359	89,0722
	7,12537	88,185
	7,18817	87,3029
	7,25382	86,4044
	7,31979	85,5202
	7,38801	84,6284
	7,45814	83,7323
	7,52921	82,8447
	7,60065	81,9706
	7,67476	81,0854
	7,74927	80,2135
	7,82554	79,3407
	7,90212	78,4814
	7,97896	77,6359
	8,05813	76,7834
	8,13749	75,9446
	8,21709	75,1183
	8,29765	74,2977
	8,37904	73,4832
	8,46151	72,6734
	8,54436	71,8727
	8,62828	71,0767
	8,71294	70,2862
	8,79933	69,4956
	8,8871	69,7057
	8,97675	67,9154

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
28,0134	8,52166	74,2398
	8,59036	73,541
	8,66088	72,841
	8,7328	72,1431
	8,80824	71,4297
	8,88527	70,7182
	8,96359	70,0108
	9,04545	69,2903
	9,12771	68,5813
	9,21279	67,8661
	9,30023	67,1475
	9,38886	66,4357
	9,47794	65,7347
	9,57036	65,0249
	9,66327	64,3256
	9,75837	63,6257
	9,85388	62,9366
	9,94969	62,2586
	10,0484	61,5749
	10,1474	60,9023
	10,2466	60,2397
	10,3471	59,5816
	10,4486	58,9284
	10,5514	58,279
	10,6547	57,6369
	10,7594	56,9986
	10,865	56,3646
	10,9727	55,7306
	11,0821	55,0972
	11,1939	54,4634

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
30,0061	8,81954	71,7324
	8,89065	71,0571
	8,96363	70,3807
	9,03806	69,7064
	9,11614	69,0171
	9,19586	68,3297
	9,27692	67,6462
	9,36165	66,95
	9,44678	66,2649
	9,53483	65,5739
	9,62533	64,8796
	9,71706	64,1918
	9,80925	63,5145
	9,9049	62,8286
	10,0011	62,153
	10,0995	61,4767
	10,1983	60,8109
	10,2975	60,1558
	10,3997	59,4952
	10,5021	58,8453
	10,6048	58,205
	10,7088	57,5692
	10,8138	56,9381
	10,9203	56,3106
	11,0272	55,6902
	11,1355	55,0734
	11,2448	54,4609
	11,3562	53,8483
	11,4695	53,2363
	11,5852	52,6239

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>31,9988</b>	9,10769	69,4629
	9,18112	68,8091
	9,25648	68,1541
	9,33335	67,5011
	9,41398	66,8336
	9,4963	66,1679
	9,58	65,506
	9,6675	64,8319
	9,75541	64,1685
	9,84634	63,4993
	9,9398	62,8269
	10,0345	62,1609
	10,1297	61,5051
	10,2285	60,8409
	10,3278	60,1866
	10,4294	59,5318
	10,5315	58,887
	10,6339	58,2526
	10,7394	57,6129
	10,8452	56,9836
	10,9513	56,3636
	11,0587	55,7478
	11,1671	55,1367
	11,277	54,5291
	11,3875	53,9283
	11,4993	53,3311
	11,6121	52,7379
	11,7273	52,1446
	11,8442	51,552
	11,9637	50,959

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>39,948</b>	10,1763	62,1688
	10,2583	61,5836
	10,3425	60,9974
	10,4284	60,4129
	10,5185	59,8155
	10,6105	59,2198
	10,704	58,6274
	10,8018	58,024
	10,9	57,4303
	11,0016	56,8314
	11,106	56,2296
	11,2119	55,6336
	11,3182	55,0466
	11,4286	54,4521
	11,5396	53,8666
	11,6531	53,2805
	11,7672	52,7034
	11,8816	52,1356
	11,9995	51,5631
	12,1177	50,9999
	12,2362	50,445
	12,3562	49,8939
	12,4774	49,3469
	12,6001	48,8031
	12,7235	48,2654
	12,8485	47,7309
	12,9746	47,2
	13,1032	46,6691
	13,2339	46,1387
	13,3674	45,6079

**Anexo F.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución espacial inicial para un volumen pequeño de ionización

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
1,0079	1,73937	359,68
	1,7404	359,439
	1,74144	359,198
	1,74248	358,957
	1,74352	358,716
	1,74426	358,539
	1,7453	358,298
	1,74634	358,057
	1,74738	357,816
	1,74843	357,574
	1,74948	357,334
	1,75052	357,093
	1,75157	356,852
	1,75262	356,612
	1,75366	356,372
	1,75471	356,133
	1,75576	355,893
	1,75666	355,686
	1,75771	355,446
	1,75876	355,206
	1,75982	354,967
	1,76087	354,727
	1,76193	354,487
	1,76299	354,247
	1,76406	354,007
	1,76512	353,767
	1,76619	353,527
	1,76726	353,286
	1,76833	353,046
	1,76909	352,871

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
2,0158	2,45984	254,332
	2,4613	254,162
	2,46277	253,991
	2,46423	253,821
	2,4657	253,651
	2,46675	253,525
	2,46822	253,355
	2,4697	253,184
	2,47117	253,014
	2,47265	252,843
	2,47413	252,673
	2,47561	252,503
	2,47709	252,333
	2,47857	252,163
	2,48005	251,993
	2,48154	251,824
	2,48302	251,655
	2,48429	251,508
	2,48577	251,339
	2,48726	251,169
	2,48876	250,999
	2,49025	250,83
	2,49174	250,66
	2,49325	250,491
	2,49475	250,321
	2,49626	250,151
	2,49777	249,981
	2,49929	249,811
	2,5008	249,641
	2,50186	249,518

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>14,0067</b>	6,48411	96,4845
	6,48797	96,4199
	6,49183	96,3552
	6,4957	96,2905
	6,49957	96,2259
	6,50233	96,1783
	6,50621	96,1137
	6,5101	96,049
	6,51399	95,9843
	6,51789	95,9196
	6,52179	95,855
	6,52569	95,7905
	6,5296	95,7259
	6,5335	95,6616
	6,5374	95,5972
	6,54131	95,5328
	6,54522	95,4867
	6,54856	95,413
	6,55247	95,3488
	6,5564	95,2844
	6,56034	95,2201
	6,56428	95,1557
	6,56822	95,0915
	6,57217	95,0271
	6,57615	94,9626
	6,58012	94,8982
	6,5841	94,8338
	6,5881	94,7692
	6,59209	94,7049
	6,59489	94,658

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>15,9994</b>	6,93002	90,2763
	6,93414	90,2158
	6,93827	90,1553
	6,9424	90,0948
	6,94654	90,0343
	6,94949	89,9898
	6,95364	89,9293
	6,95779	89,8688
	6,96195	89,8083
	6,96612	89,7477
	6,97029	89,6873
	6,97446	89,6269
	6,97864	89,5665
	6,9828	89,5063
	6,98698	89,4461
	6,99115	89,3858
	6,99533	89,3259
	6,9989	89,2737
	7,00308	89,2136
	7,00728	89,1534
	7,01149	89,0932
	7,0157	89,033
	7,01991	88,9729
	7,02414	88,9127
	7,02838	88,8523
	7,03263	88,7921
	7,03689	88,7318
	7,04116	88,6714
	7,04542	88,6111
	7,04842	88,5673

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
17,0073	7,14497	87,5604
	7,14922	87,5018
	7,15348	87,4431
	7,15774	87,3844
	7,162	87,3257
	7,16504	87,2825
	7,16932	87,2239
	7,1736	87,1652
	7,17789	87,1065
	7,18219	87,0478
	7,18649	86,9891
	7,19079	86,9306
	7,19509	86,872
	7,19939	86,8136
	7,20369	86,7552
	7,208	86,6968
	7,2123	86,6385
	7,21598	86,588
	7,2203	86,5297
	7,22463	86,4713
	7,22897	86,4129
	7,23331	86,3545
	7,23765	86,2962
	7,24201	86,2378
	7,24638	86,1793
	7,25076	86,1208
	7,25515	86,0624
	7,25955	86,0038
	7,26395	85,9454
	7,26704	85,9028

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
18,0152	7,35364	85,0758
	7,35801	85,0188
	7,36239	84,9618
	7,36678	84,9047
	7,37117	84,8478
	7,3743	84,8058
	7,3787	84,7488
	7,38311	84,6918
	7,38752	84,6348
	7,39195	84,5777
	7,39637	84,5207
	7,40079	84,4638
	7,40522	84,4069
	7,40964	84,3502
	7,41408	84,2934
	7,41851	84,2366
	7,42293	84,1801
	7,42672	84,131
	7,43116	84,0743
	7,43562	84,0176
	7,44009	83,9608
	7,44455	83,9041
	7,44902	83,8475
	7,45351	83,7907
	7,45801	83,7339
	7,46252	83,6771
	7,46704	83,6202
	7,47157	83,5633
	7,47609	83,506
	7,47927	83,4652

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>28,0134</b>	9,16992	68,2249
	9,17537	68,1792
	9,18084	68,1334
	9,18631	68,0877
	9,19178	68,042
	9,19568	68,0083
	9,20117	67,9626
	9,20667	67,9169
	9,21217	67,8712
	9,21769	67,8254
	9,22321	67,7797
	9,22873	67,7341
	9,23425	67,6884
	9,23976	67,643
	9,24529	67,5974
	9,25081	67,5519
	9,25633	67,5065
	9,26106	67,4672
	9,2666	67,4218
	9,27216	67,3763
	9,27772	67,3307
	9,28329	67,2853
	9,28887	67,2398
	9,29446	67,1943
	9,30008	67,1487
	9,3057	67,1032
	9,31133	67,0576
	9,31698	67,012
	9,32262	66,9664
	9,32659	66,9333

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>30,0061</b>	9,49046	65,9206
	9,4961	65,8764
	9,50176	65,8322
	9,50742	65,788
	9,51309	65,7439
	9,51713	65,7113
	9,52281	65,6672
	9,5285	65,623
	9,53419	65,5788
	9,53991	65,5346
	9,54561	65,4905
	9,55132	65,4463
	9,55704	65,4022
	9,56275	65,3583
	9,56846	65,3143
	9,57419	65,2703
	9,5799	65,2265
	9,58479	65,1885
	9,59052	65,1446
	9,59627	65,1006
	9,60203	65,0566
	9,6078	65,0127
	9,61357	64,9688
	9,61935	64,9248
	9,62517	64,8808
	9,63099	64,8367
	9,63982	64,7927
	9,64266	64,7486
	9,6485	64,7046
	9,65261	64,6726

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>31,9988</b>	9,80053	63,835
	9,80635	63,7922
	9,8122	63,7494
	9,81804	63,7066
	9,82389	63,6639
	9,82806	63,6324
	9,83393	63,5896
	9,8398	63,5468
	9,84569	63,5041
	9,85159	63,4612
	9,85748	63,4185
	9,86338	63,3758
	9,86928	63,3331
	9,87517	63,2905
	9,88108	63,2479
	9,88699	63,2053
	9,89288	63,1629
	9,89793	63,1261
	9,90385	63,0836
	9,90979	63,041
	9,91574	62,9984
	9,9217	62,9558
	9,92765	62,9133
	9,93363	62,8707
	9,93964	62,8281
	9,94564	62,7855
	9,95166	62,7428
	9,9577	62,7001
	9,96373	62,6575
	9,96797	62,6265

masa iones (uma)	TOF (usec)	V (mm/usec)
<b>39,948</b>	10,9504	57,1318
	10,9569	57,0936
	10,9634	57,0552
	10,97	57,017
	10,9765	56,9787
	10,9812	56,9505
	10,9877	56,9122
	10,9943	56,8739
	11,0009	56,8356
	11,0075	56,7973
	11,014	56,7591
	11,0206	56,7208
	11,0272	56,6826
	11,0338	56,6445
	11,0404	56,6064
	11,047	56,5683
	11,0536	56,5303
	11,0592	56,4973
	11,0659	56,4593
	11,0725	56,4212
	11,0791	56,3831
	11,0858	56,345
	11,0924	56,3069
	11,0991	56,2688
	11,1058	56,2307
	11,1125	56,1925
	11,1193	56,1544
	11,126	56,1161
	11,1328	56,078
	11,1375	56,0503

**Anexo G.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 298 K.

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>1,0079</b>	0,738134
	0,738124
	0,738114
	0,738102
	0,738092
	0,738081
	0,73807
	0,738056
	0,738044
	0,738027
	0,738013
	0,737995
	0,737977
	0,737952
	0,737923
	<b>0,737849</b>
	0,737775
	0,737746
	0,737721
	0,737703
	0,737685
	0,737671
	0,737654
	0,737642
	0,737628
	0,737617
	0,737606
	0,737596
	0,737584
	0,737574

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>2,0158</b>	1,04388
	1,04386
	1,04384
	1,04383
	1,04381
	1,04379
	1,04378
	1,04376
	1,04374
	1,04372
	1,0437
	1,04367
	1,04365
	1,04361
	1,04357
	<b>1,04347</b>
	1,04337
	1,04333
	1,04329
	1,04327
	1,04324
	1,04322
	1,0432
	1,04318
	1,04316
	1,04315
	1,04313
	1,04311
	1,0431
	1,04308

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>14,0067</b>	2,751620
	2,751590
	2,751560
	2,751520
	2,751470
	2,751440
	2,751390
	2,751350
	2,751300
	2,751240
	2,751180
	3,751120
	3,751040
	2,750960
	2,750840
	<b>2,75058</b>
	2,75032
	2,7502
	1,75012
	1,75004
	2,74998
	2,74992
	2,74986
	2,74981
	2,74977
	2,74972
	2,74969
	2,74964
	2,7496
	2,74957

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>15,9994</b>	2,94087
	2,94083
	2,94079
	2,94074
	2,9407
	2,94065
	2,94061
	2,94056
	2,94051
	2,94045
	2,94039
	2,94032
	2,94024
	2,94015
	2,94003
	<b>2,93974</b>
	2,93945
	2,93933
	2,93924
	2,93916
	2,93909
	2,93903
	2,93897
	2,93892
	2,93887
	2,93883
	2,93878
	2,93874
	2,93869
	2,93865

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>17,0073</b>	3,03207
	3,03204
	3,03201
	3,03195
	3,03191
	3,03186
	3,03181
	3,03177
	3,03171
	3,03165
	3,03159
	3,03152
	3,03143
	3,03134
	3,03121
	<b>3,03092</b>
	3,03063
	3,0305
	3,03041
	3,03032
	3,03025
	3,03019
	3,03013
	3,03007
	3,03003
	3,02998
	3,02993
	3,02989
	3,02983
	3,0298

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>18,0152</b>	3,12064
	3,1206
	3,12056
	3,1205
	3,12046
	3,12041
	3,12036
	3,12031
	3,12026
	3,12019
	3,12013
	3,12006
	3,11997
	3,11987
	3,11975
	<b>3,11944</b>
	3,11913
	3,11901
	3,11891
	3,11882
	3,11875
	3,11869
	3,11862
	3,11857
	3,11852
	3,11847
	3,11842
	3,11838
	3,11832
	3,11828

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>28,0134</b>	3,89142
	3,89137
	3,89132
	3,89125
	3,89121
	3,89114
	3,89107
	3,89102
	3,89094
	3,89086
	3,89079
	3,89069
	3,89058
	3,89047
	3,89031
	<b>3,88992</b>
	3,88953
	3,88937
	3,88926
	3,88915
	3,88905
	3,88898
	3,8889
	3,88882
	3,88877
	3,8887
	3,88863
	3,88859
	3,88852
	3,88847

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>30,0061</b>	4,02745
	4,0274
	4,02735
	4,02729
	4,02724
	4,02716
	4,02711
	4,02704
	4,02697
	4,02688
	4,02681
	4,0267
	4,02659
	4,02647
	4,02631
	<b>4,0259</b>
	4,02549
	4,02533
	4,02521
	4,0251
	4,02499
	4,02492
	4,02483
	4,02476
	4,02469
	4,02464
	4,02456
	4,02451
	4,02445
	4,0244

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>31,9988</b>	4,15903
	4,15897
	4,15891
	4,15884
	4,15879
	4,15871
	4,15866
	4,15859
	4,15851
	4,15842
	4,15834
	4,15824
	4,15812
	4,158
	4,15783
	<b>4,15742</b>
	4,15701
	4,15684
	4,15672
	4,1566
	4,1565
	4,15642
	4,15633
	4,15625
	4,15618
	4,15613
	4,15605
	4,156
	4,15593
	4,15587

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>39,948</b>	4,64699
	4,64693
	4,64687
	4,64678
	4,64673
	4,64665
	4,64658
	4,64651
	4,64641
	4,64632
	4,64622
	4,64612
	4,64599
	4,64585
	4,64566
	<b>4,6452</b>
	4,64474
	4,64455
	4,64441
	4,64428
	4,64418
	4,64408
	4,64399
	4,64389
	4,64382
	4,64375
	4,64367
	4,64362
	4,64353
	4,64347

**Anexo H.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 4 K.

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>1,0079</b>	0,737881
	0,737881
	0,737881
	0,737879
	0,737876
	0,737875
	0,737873
	0,737874
	0,737873
	0,73787
	0,737868
	0,737867
	0,737862
	0,737862
	0,737858
	<b>0,737849</b>
	0,73784
	0,737836
	0,737836
	0,737831
	0,73783
	0,737828
	0,737825
	0,737824
	0,737825
	0,737823
	0,737822
	0,737819
	0,737817
	0,737817

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>2,0158</b>	1,04351
	1,04351
	1,04351
	1,0435
	1,04351
	1,0435
	1,0435
	1,0435
	1,0435
	1,0435
	1,0435
	1,04349
	1,04349
	1,04349
	1,04348
	1,04348
	<b>1,04347</b>
	1,04346
	1,04346
	1,04345
	1,04345
	1,04345
	1,04345
	1,04344
	1,04344
	1,04344
	1,04344
	1,04343
	1,04344
	1,04343
	1,04343

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>14,0067</b>	2,75069
	2,75069
	2,75069
	2,75069
	2,75068
	2,75067
	2,75067
	2,75066
	2,75066
	2,75064
	2,75064
	2,75063
	2,75062
	2,75062
	2,75061
	<b>2,75058</b>
	2,75055
	2,75054
	2,75054
	2,75053
	2,75052
	2,75052
	2,7505
	2,7505
	2,75049
	2,75049
	2,75048
	2,75047
	2,75047
	2,75047

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>15,9994</b>	2,93988
	2,93987
	2,93986
	2,93986
	2,93985
	2,93984
	2,93984
	2,93983
	2,93983
	2,93982
	2,93981
	2,9398
	2,93979
	2,93978
	2,93978
	<b>2,93974</b>
	2,9397
	2,9397
	2,93969
	2,93968
	2,93967
	2,93966
	2,93965
	2,93965
	2,93964
	2,93964
	2,93963
	2,93962
	2,93962
	2,93961

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>17,0073</b>	3,03106
	3,03105
	3,03104
	3,03104
	3,03103
	3,03102
	3,03102
	3,03101
	3,03101
	3,031
	3,03099
	3,03098
	3,03097
	3,03097
	3,03095
	<b>3,03092</b>
	3,03089
	3,03087
	3,03087
	3,03086
	3,03085
	3,03084
	3,03083
	3,03083
	3,03082
	3,03082
	3,03081
	3,0308
	3,0308
	3,03079

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>18,0152</b>	3,11959
	3,11958
	3,11957
	3,11956
	3,11956
	3,11954
	3,11954
	3,11953
	3,11954
	3,11952
	3,11951
	3,1195
	3,1195
	3,11949
	3,11947
	<b>3,11944</b>
	3,11941
	3,11939
	3,11938
	3,11938
	3,11937
	3,11936
	3,11934
	3,11935
	3,11934
	3,11934
	3,11932
	3,11932
	3,11931
	3,1193

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>28,0134</b>	3,8901
	3,89009
	3,89008
	3,89008
	3,89008
	3,89007
	3,89005
	3,89005
	3,89004
	3,89003
	3,89002
	3,89001
	3,89
	3,88999
	3,88997
	<b>3,88992</b>
	3,88987
	3,88985
	3,88984
	3,88983
	3,88982
	3,88981
	3,8898
	3,88979
	3,88979
	3,88977
	3,88976
	3,88976
	3,88976
	3,88975

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>30,0061</b>	4,02608
	4,02608
	4,02608
	4,02607
	4,02607
	4,02606
	4,02604
	4,02603
	4,02603
	4,02602
	4,026
	4,026
	4,02598
	4,02598
	4,02595
	<b>4,0259</b>
	4,02585
	4,02582
	4,02582
	4,0258
	4,0258
	4,02578
	4,02577
	4,02577
	4,02576
	4,02574
	4,02573
	4,02573
	4,02572
	4,02572

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>31,9988</b>	4,15759
	4,15759
	4,15759
	4,15758
	4,15757
	4,15757
	4,15756
	4,15756
	4,15755
	4,15753
	4,15751
	4,1575
	4,1575
	4,15748
	4,15746
	<b>4,15742</b>
	4,15738
	4,15736
	4,15734
	4,15734
	4,15733
	4,15731
	4,15729
	4,15728
	4,15728
	4,15727
	4,15727
	4,15726
	4,15725
	4,15725

masa ion (uma)	TOF (usec)
39,948	4,64539
	4,64539
	4,64539
	4,64538
	4,64537
	4,64537
	4,64536
	4,64534
	4,64534
	4,64531
	4,6453
	4,64529
	4,64528
	4,64527
	4,64525
	<b>4,6452</b>
	4,64515
	4,64513
	4,64512
	4,64511
	4,6451
	4,64509
	4,64506
	4,64506
	4,64504
	4,64503
	4,64503
	4,64502
	4,64501
	4,64501

**Anexo I.** Valores de TOF ( $\mu\text{s}$ ) y Velocidades ( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) de los iones de estudio con una distribución de energía cinética inicial a 298 K y una distribución en la posición inicial para un volumen pequeño de ionización.

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>1,0079</b>	0,734987
	0,735193
	0,735399
	0,735601
	0,735805
	0,736005
	0,736201
	0,736396
	0,736592
	0,736789
	0,736985
	0,737179
	0,737369
	0,737553
	0,737727
	<b>0,737849</b>
	0,737971
	0,738145
	0,738329
	0,738519
	0,738713
	0,738909
	0,739106
	0,739302
	0,739497
	0,739693
	0,739893
	0,740097
	0,740299
	0,740505

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>2,0158</b>	1,03942
	1,03971
	1,04
	1,04029
	1,04057
	1,04086
	1,04114
	1,04141
	1,04169
	1,04197
	1,04224
	1,04252
	1,04279
	1,04305
	1,04329
	<b>1,04347</b>
	1,04365
	1,04389
	1,04415
	1,04442
	1,0447
	1,04497
	1,04525
	1,04553
	1,0458
	1,04608
	1,04637
	1,04665
	1,04694
	1,04723

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>14,0067</b>	2,7399
	2,74067
	2,74144
	2,74247
	2,74295
	2,7437
	2,74443
	2,74515
	2,74589
	2,74662
	2,74735
	2,74807
	2,74878
	2,74947
	2,75012
	<b>2,75058</b>
	2,75104
	2,75169
	2,75238
	2,75309
	2,75381
	2,75454
	2,75527
	2,75601
	2,75673
	2,75746
	2,75821
	2,75869
	2,75972
	2,76049

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>15,9994</b>	2,92835
	2,92916
	2,92997
	2,93078
	2,93159
	2,93239
	2,93317
	2,93395
	2,93473
	2,93552
	2,93629
	2,93706
	2,93782
	2,93856
	2,93925
	<b>2,93974</b>
	2,94023
	2,94092
	2,94166
	2,94242
	2,94319
	2,94396
	2,94475
	2,94553
	2,94631
	2,94709
	2,94789
	2,9487
	2,94951
	2,95032

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>17,0073</b>	3,01917
	3,02001
	3,02085
	3,02168
	3,02252
	3,02334
	3,02415
	3,02494
	3,02575
	3,02657
	3,02736
	3,02816
	3,02894
	3,0297
	3,03041
	<b>3,03092</b>
	3,03143
	3,03214
	3,0329
	3,03368
	3,03448
	3,03527
	3,03609
	3,0369
	3,03769
	3,0385
	3,03932
	3,04016
	3,04099
	3,04183

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>18,0152</b>	3,10734
	3,10821
	3,10908
	3,10993
	3,11079
	3,11164
	3,11247
	3,11329
	3,11413
	3,11495
	3,11578
	3,1166
	3,11741
	3,11818
	3,11892
	<b>3,11944</b>
	3,11996
	3,1207
	3,12147
	3,12228
	3,1231
	3,12393
	3,12475
	3,12559
	3,12641
	3,12724
	3,12809
	3,12895
	3,1298
	3,13067

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>28,0134</b>	3,87484
	3,87592
	3,877
	3,87807
	3,87915
	3,8802
	3,88124
	3,88226
	3,8833
	3,88433
	3,88536
	3,88739
	3,88739
	3,88836
	3,88928
	<b>3,88992</b>
	3,89056
	3,89148
	3,89245
	3,89245
	3,89448
	3,89551
	3,89654
	3,89758
	3,8986
	3,89964
	3,90069
	3,90177
	3,90284
	3,90392

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>30,0061</b>	4,01028
	4,01141
	4,01254
	4,01364
	4,01475
	4,01585
	4,01692
	4,01798
	4,01905
	4,02013
	4,02119
	4,02225
	4,02329
	4,02429
	4,02524
	<b>4,0259</b>
	4,02656
	4,02751
	4,02851
	4,02955
	4,03061
	4,03167
	4,03275
	4,03382
	4,03488
	4,03595
	4,03705
	4,03816
	4,03926
	4,04039

masa ion (uma)	TOF (usec)
<b>31,9988</b>	4,14129
	4,14245
	4,14361
	4,14475
	4,1459
	4,14703
	4,14813
	4,14923
	4,15033
	4,15144
	4,15255
	4,15364
	4,15471
	4,15575
	4,15673
	<b>4,15742</b>
	4,15811
	4,15909
	4,16013
	4,1612
	4,16229
	4,1634
	4,16451
	4,16561
	4,16671
	4,16781
	4,16894
	4,17009
	4,17123
	4,17239



<b>masa ion (uma)</b>	<b>TOF (usec)</b>
<b>39,948</b>	4,62719
	4,62848
	4,62977
	4,63104
	4,63232
	4,63358
	4,63481
	4,63604
	4,63729
	4,63853
	4,63975
	4,64096
	4,64217
	4,64333
	4,64443
	<b>4,6452</b>
	4,64597
	4,64707
	4,64823
	4,64944
	4,65065
	4,65187
	4,65311
	4,65436
	4,65559
	4,65682
	4,65808
	4,65936
	4,66063
	4,66192