



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

VISUALIZACIÓN Y RASTREO DE PARTÍCULAS DE SALIVA EXPULSADAS POR DIFERENTES INSTRUMENTOS DE ALIENTO DURANTE SU EJECUCIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)

PRESENTA:
AARON ALI LOZANO ROCHA

TUTOR O TUTORES PRINCIPALES
DR. PABLO LUIS RENDÓN GARRIDO
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR
DR. JOSÉ FEDERICO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR
DR. CARLOS MÁLAGA IGUIÑIZ
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y
TECNOLOGÍA

VISUALIZACIÓN Y RASTREO DE PARTÍCULAS DE
SALIVA EXPULSADAS POR DIFERENTES
INSTRUMENTOS DE ALIENTO DURANTE SU
EJECUCIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS FÍSICAS

P R E S E N T A :

AARON ALI LOZANO ROCHA

TUTOR

PABLO LUIS RENDÓN GARRIDO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2023



«It's the questions we can't answer that teach us the most. They teach us how to think. If you give a man an answer, all he gains is a little fact. But give him a question and he'll look for his own answers.»

Patrick Rothfuss

Agradecimientos

Quiero aprovechar esta sección para agradecer a todas las personas que me ayudaron de cierta manera a la realización de este trabajo comenzando por mi familia, a mi madre Alejandra por apoyarme y estar siempre presente, a mi hermana Abril y a mis padres Alfredo y Abel, a mi querida abuela Salome, a mi tía Gaby y demás familiares por apoyar y valorar mi esfuerzo.

Agradezco de igual forma a mi compañero de laboratorio Felipe por su compañía y apoyo, a mis tutores Pablo Luis Rendón Garrido y Federico Henández Sánchez por su gran liderazgo y su buena manera de exortarme en mi formación profesional pero sobre todo por ser personas valiosas y motivadoras.

Agradezco el apoyo de Erick técnico del laboratorio de acústica y vibraciones del ICAT, Benjamín Valera técnico académico del ICAT y a Naser Qureshi por ayudarme a resolver problemas técnicos en la realización de este trabajo.

Agradezco también el financiamiento de los siguientes proyectos:

- CONAHCYT A1-S-17650
- PAPIIT IN113820
- PAPIIT IN117823

Índice general

Agradecimientos	v
1. Resumen	1
2. Introducción	3
2.1. Pandemia de SARS-COV-2	3
2.2. Enfermedades respiratorias infecciosas	5
2.3. Algunos parámetros adimensionales importantes	7
2.3.1. Número de Reynolds	7
2.3.2. Número de Stokes	8
2.4. Trayectorias balísticas con y sin arrastre	9
2.5. COVID-19 en música	13
3. Metodología	19
3.1. Diseño del arreglo experimental	19
3.2. Protocolo para hacer las pruebas	25
3.3. Velocimetría por rastreo de partículas (<i>Particle Tracking Velocimetry</i>)	27
3.4. Procesamiento de datos	29
4. Resultados	31
4.1. Clarinete	32
4.2. Clarinete bajo	34
4.3. Corno francés	36
4.4. Fagot	38
4.5. Agujeros del fagot	40
4.6. Flauta	42
4.7. Pie de flauta	44
4.8. Oboe	46
4.9. <i>Piccolo</i> (flautín)	48
4.10. Trombón	50
4.11. Trompeta	52
4.12. Resultados generales	54

5. Discusión	59
5.1. Clarinete	59
5.2. Clarinete bajo	59
5.3. Corno francés	60
5.4. Fagot	60
5.5. Agujeros del fagot	60
5.6. Flauta	61
5.7. Pie de flauta	61
5.8. Oboe	61
5.9. <i>Piccolo</i> (flautín)	62
5.10. Trombón	62
5.11. Trompeta	62
6. Conclusiones	63
Apéndice A. Función <i>magicwandbw</i>	65
Apéndice B. Función <i>Rtp</i>	67
Apéndice C. <i>Procesamiento de datos</i>	69
C.1. Parámetros importantes durante todo el algoritmo, y primer filtro para discriminar partículas rastreadas	69
C.2. Cálculo de velocidades, ángulos de inclinación y discriminación de polvo por velocidad promedio de las partículas	75
C.3. Promedios, desviaciones estándar y ángulos importantes guardados en <i>results</i> .	77
C.4. Segundo filtro por promedio de velocidades de las partículas	78
C.5. Arreglos guardados como archivos <i>.csv</i>	79
C.6. Obtención del diámetro de la partícula	80
C.7. Cálculo del alcance con modelo de tiro parabólico	84
C.8. Gráficas	85
C.8.1. Máximo de intensidades	85
C.8.2. Máximo de intensidades con trayectorias	87
C.8.3. Dispersión de velocidades promedio	89
C.8.4. Diámetros de las partículas rastreadas por instrumento	90
C.8.5. Alcance y gráficas de barras	91
Referencias	95
Bibliografía	97

1 Resumen

La dispersión de aerosoles y gotas de saliva ha tenido un desarrollo bastante importante en los últimos años por las necesidades de controlar la propagación de enfermedades de transmisión respiratoria. Un caso bastante específico de este problema está en los instrumentos de aliento de una orquesta sinfónica. Aunque existen algunos estudios en los que miden la propagación de aerosoles utilizando técnicas como velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés), incluso simulaciones de concentración de aerosoles en salas completas, existen aún brechas que se pueden seguir explorando. En esta tesis se realiza rastreo de gotas de saliva utilizando fluorescencia inducida por láser plano (PLIF por sus siglas en inglés) expulsadas por 9 diferentes instrumentos de la orquesta sinfónica (clarinete, clarinete bajo, fagot, oboe, flauta, *piccolo*, trompeta, trombón y corno francés) ejecutando dos ejercicios diferentes. El primero tocando un solo del repertorio orquestal. El segundo tocando escalas ascendentes y descendentes en diferentes niveles dinámicos. El alcance es calculado con un modelo de tiro parabólico sin resistencia del aire para proponer una distancia la que las gotas no puedan llegar. Los alcances encontrados para todos los instrumentos están por debajo de los 40 *cm*. También se calcula el diámetro de las gotas rastreadas las cuales están entre 60 y 3300 μm . No se observa que un nivel dinámico alto favorezca la expulsión de gotas de saliva en general.

2 Introducción

2.1. Pandemia de SARS-COV-2

El 31 diciembre del 2019 las autoridades de salud chinas alertaron a la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) sobre un número inusual de casos de neumonía causados por razones desconocidas en la ciudad de Wuhan en la provincia de Hubei. Después, a principios de enero del 2020 fue nombrado originalmente 2019-nCoV por la WHO y posteriormente renombrado cómo SARS-CoV-2 por el Grupo de Estudios de Coronavirus (CSG por sus siglas en inglés) del comité internacional en taxonomía y virus. A su vez la WHO nombró a la enfermedad simplemente como “coronavirus disease 2019” o simplemente COVID-19. El 30 de enero del mismo año se confirmaron cerca de 8,000 casos, poco más de 12,000 sospechas de la misma enfermedad en China y 82 casos en 18 países extranjeros. Fue en este momento que la WHO declaró el brote de SARS-CoV-2 como una emergencia de salud pública de orden internacional (PHEIC por sus siglas en inglés). De acuerdo con la comisión nacional de salud de China, la tasa de mortalidad en los casos de pacientes hospitalizados estaba entre 11 % y 15 % ^[1]. Fue a partir de este momento que muchos países alrededor del mundo comenzaron a tomar algunas medidas de seguridad entre sus ciudadanos para evitar que la propagación de este virus ocurriera de forma descontrolada.

Este ha sido uno de los problemas al que nos hemos enfrentado de manera global en los últimos años, que según datos de la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) está a punto de llegar a los siete millones de muertes en tan solo 3 años ^[2.1]. La forma en que este virus se transmite de portador a portador, de lo cual se hablará más adelante, tiene dos hipótesis. La primera, el contacto de las manos con superficies infectadas que transporten el virus a la nariz, boca u ojos. La segunda, respirar pequeñas gotas de personas contagiadas.

Esto condujo a hacer cambios radicales en muchas de las actividades humanas diarias mientras la mayoría de la población era vacunada. Los canales de comunicación a distancia tuvieron un desarrollo acelerado y en muchos casos una saturación enorme. En general, la creatividad humana se vio explotada para realizar muchas actividades desde casa. La educación básica, por ejemplo, tuvo que requerir una mayor presencia de los padres en las

¹Información consultada en <https://covid19.who.int/>

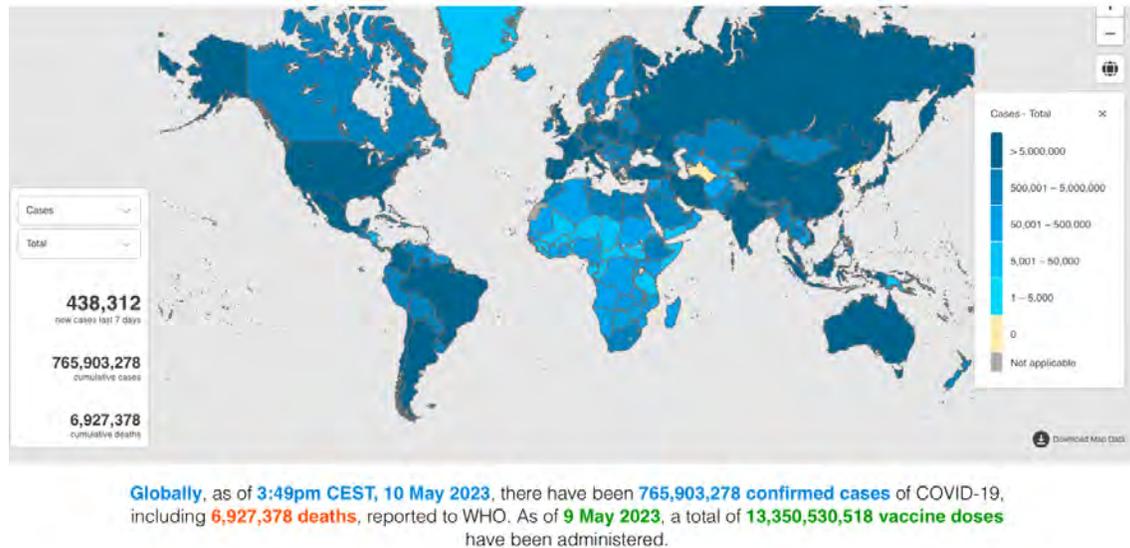


Figura 2.1: Mapa del mundo con el número de contagios por COVID-19 hasta Mayo del 2023 tomada de <https://covid19.who.int/>.

actividades de los pequeños estudiantes. Por otro lado aquellas personas que solamente requerían tener acceso a internet para poder realizar su trabajo probablemente no tuvieron que hacer cambios muy grandes en su rutina, aunque estar completamente aislado en casa crea problemas distintos al romper por completo la interacción humana de forma presencial.

En la educación superior todo dependió de la carrera en cuestión. Muchas de las clases teóricas en las que un diálogo con el profesor y tal vez la consulta de algún texto fuera suficiente para transmitir la información requerida por el alumno no tuvieron complicaciones. Sin embargo, otras clases en las que el aprendizaje dependiera de la interacción directa con algún instrumento o material especializado que no estuviera al alcance supusieron una dificultad importante. Por ejemplo, un estudiante de química que quisiera hacer una prueba en su laboratorio con reactivos adecuados y difíciles de conseguir no tenía manera alguna de realizar el experimento en casa. Un estudiante de ingeniería que tuviera como objetivo familiarizarse con los componentes de un motor diesel, probablemente se le presentó la misma dificultad.

En la sección de entretenimiento y puntualmente en música, muchos de los conciertos de orquestas sinfónicas fueron cancelados en muchas partes del mundo para tratar de evitar aglomeraciones. Al reanudar las presentaciones tanto a los músicos de percusiones como a los músicos de cuerdas fue suficiente con colocarles un cubrebocas y alejarlos en su posición en el escenario para poder reanudar las presentaciones. Sin embargo los músicos de alientos no tuvieron la misma suerte, colocarles un cubrebocas no fue opción, además el distanciamiento cambió la acústica de las orquestas, en la mayoría de los casos para mal. Existen algunos estudios ([5], [8], [9] y [10]) en donde miden algunas variables relacionadas con la propagación

de gotas expelidas por diferentes instrumentos de aliento, sin embargo se centran en mediciones de tamaños, concentraciones, así como simulaciones de la dinámica de las partículas que se quedan suspendidas en el aire (*i.e.* siguen el flujo de fondo) en recintos específicos, y es por eso que en este trabajo nos dedicamos a realizar un estudio sobre las trayectorias balísticas de partículas de saliva expulsadas por diferentes instrumentos de aliento de músicos de orquesta sinfónica, es decir que no se queden suspendidas en el aire al momento de salir del instrumento. Más adelante hay una sección en la que se da el preámbulo más detallado del problema.

Aun cuando las autoridades dieron la indicación de regresar de manera controlada en México a los lugares de trabajo, hubo algunas complicaciones. Por ejemplo, en muchos lugares públicos se decidió definir un aforo máximo en función del tamaño y ventilación del lugar y esto dió lugar a largas filas de espera. El uso del cubrebocas se hizo obligatorio en todos los lugares públicos, aunque probablemente los lugares al aire libre pudieron estar exentas de esta regla como se hizo en varias partes de Europa. Ganczak *et al.* [2] (2021) realizaron observaciones en espacios públicos en Polonia en tres fechas diferentes en mayo del 2020 y encuentran que aunque casi tres cuartos de las personas observadas al principio utilizaban cubrebocas de forma correcta y conforme pasaba el tiempo este número disminuía ya sea porque no se utilizaba de forma correcta o porque simplemente se omitía.

2.2. Enfermedades respiratorias infecciosas

Según el Departamento de Salud y Servicios Humanos de Carolina del Norte (NCDHHS por sus siglas en inglés) “Las enfermedades respiratorias infecciosas son causadas por gérmenes, virus, bacterias u otros microbios patógenos. Estos gérmenes pueden infectar el sistema respiratorio (pulmones, garganta y vías respiratorias) a menudo se pueden propagar a través de la mucosidad y la saliva (también conocidas como secreciones respiratorias) expulsadas cuando una persona tose, estornuda, habla o se ríe. Algunos de estos gérmenes se propagan a través de gotas lo suficientemente pequeñas como para permanecer suspendidas en el aire y viajar largas distancias. Otros vectores pueden contagiarse cuando se inhalan estas gotas y entran en contacto con sus membranas mucosas. Más a menudo, los gérmenes se propagan a través de gotitas más grandes que no permanecen suspendidas en el aire y solo viajan distancias cortas (menos de tres pies). Otro medio de contagio ocurre cuando se tocan las secreciones que quedan en una superficie o en las manos de alguien, o por contacto cercano con una persona infectada, también por compartir utensilios para comer o beber del mismo vaso”². El evitar la propagación de este tipo de enfermedades ha provocado un auge en investigación en nuestros días y ha abierto temas muy extensos en diferentes áreas, por lo que desde nuestro punto de vista, el fenómeno interesante a estudiar es la propagación gotas de saliva expelidas por instrumentos de aliento de una orquesta sinfónica que pudieran acarrear diferentes patógenos.

²Esta información fue consultada en la página oficial de la NCDHHS <https://epi.dph.ncdhhs.gov/cd/diseases/respiratory.html>

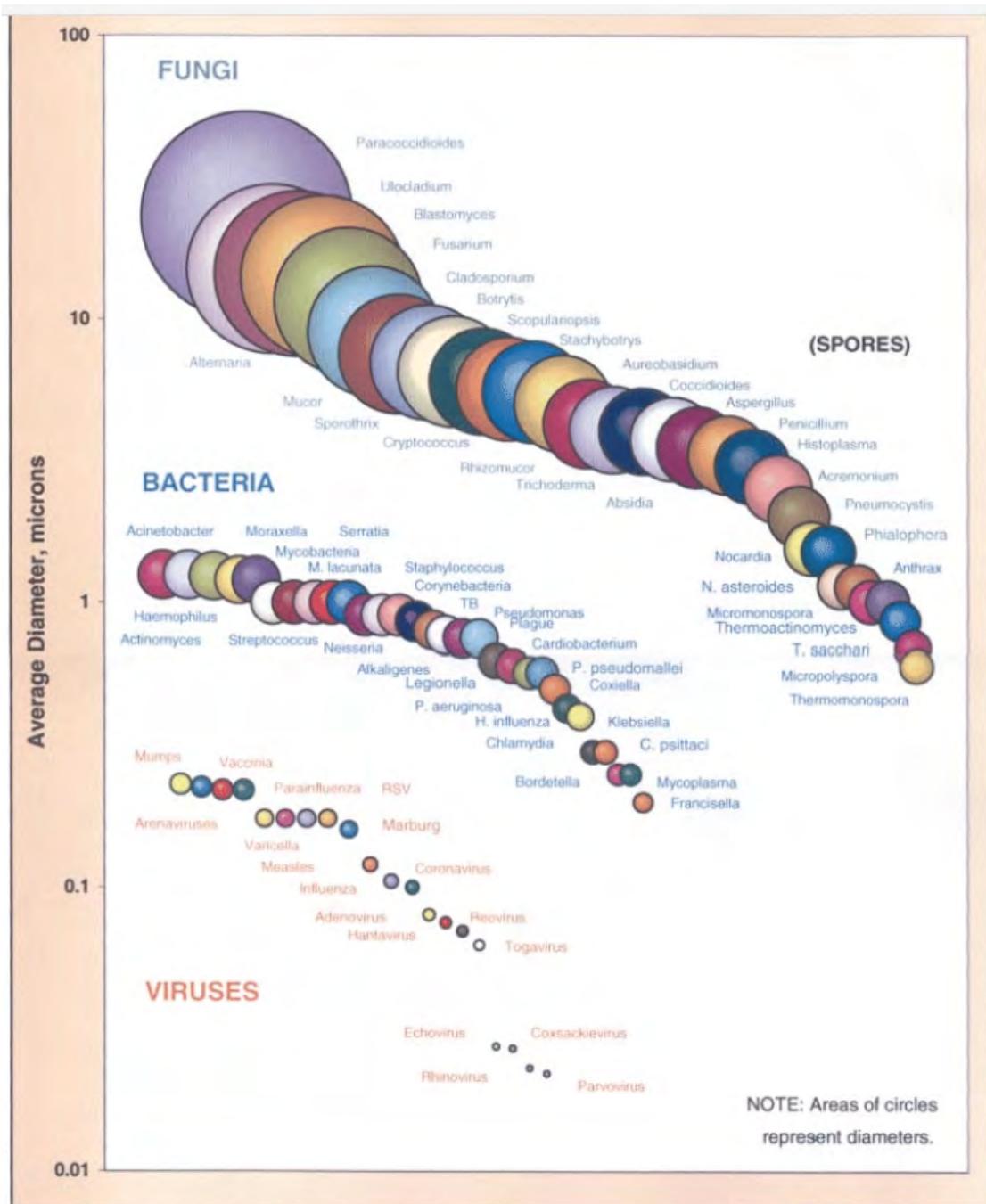


Figura 2.2: Tomada de Kowalski y Bahnfleth [3](#) (1998).

Kowalski y Bahnfleth [3] (1998) realizan una clasificación ilustrativa por origen y tamaño de diferentes patógenos que provocan ciertos tipos de enfermedades de transmisión respiratoria. Aquí podemos observar que los patógenos están agrupados por su origen, siendo las esporas (provenientes del reino fungi) los más grandes con tamaños que decenas de micras. Posteriormente las bacterias tienen tamaños de micras, seguidos por los virus cuyo tamaño está en el orden de las décimas de micras. El tamaño del virus es un elemento importante en la transmisión de COVID-19 pues puede ser transportado por partículas de saliva cuyo tamaño sea mayor, e incluso del mismo orden (ver Figura 2.2). De este modo el tamaño de las gotas de secreciones respiratorias es quien nos mostrará una clasificación en el comportamiento dinámico de las mismas.

2.3. Algunos parámetros adimensionales importantes

El problema al que nos enfrentamos es bastante complicado y esto es debido a que las gotas de secreciones respiratorias están formadas mayormente por saliva, es decir un líquido. Aunado a esto su composición y distribución de tamaños no es homogénea y depende fuertemente de las condiciones en la que es segregada [4]. Como un primer intento para describir su comportamiento podemos aproximar dichas gotas como esferas sólidas con una densidad constante en un flujo de aire. Por esto que hay que revisar ciertos parámetros adimensionales para modelar la propagación de estas gotas de forma adecuada para este fenómeno.

2.3.1. Número de Reynolds

Consideremos el movimiento de un fluido incompresible newtoniano con densidad constante ρ y bajo el efecto de un campo gravitacional que es modelada por las ecuaciones de Navier-Stokes en la siguiente expresión.

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho g_i, \quad (2.1)$$

donde μ es la viscosidad del fluido y p la presión. Utilizando el siguiente cambio de variables en la expresión 2.1

$$u' = \frac{u}{U}; \quad x' = \frac{x}{L}; \quad t' = \frac{tU}{L} \quad \& \quad p' = \frac{p - \rho g z}{\rho U^2},$$

se obtiene una ecuación cuyas variables no tienen dimensiones.

$$\frac{\partial u'_i}{\partial t'} + u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x'_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x'_j \partial x'_j}. \quad (2.2)$$

Donde U y L son una velocidad y una distancia características del fluido. En este caso L será el diámetro de la partícula y $\rho g z$ la presión a una altura z en el fluido. Notese que la ecuación 2.2 depende de variables adimensionales y el parámetro

$$Re = \frac{\rho L U}{\mu}, \quad (2.3)$$

llamado número de Reynolds. Variando de forma distinta los valores de ρ , L , U y μ , siempre y cuando el parámetro anterior sea el mismo, todos los problemas tendrán una solución similar en las variables x' y u' , por lo que el número de Reynolds nos da una clasificación sobre el comportamiento del fluido.

Es importante conocer en qué régimen estamos para seguir describiendo nuestro fenómeno de una forma adecuada, de modo que con los parámetros que se muestran en la Tabla 2.1³ se obtiene $Re \in [0.72, 36]$.

Parametro	Valor
ρ_{aire}	$0.96 \frac{kg}{m^3}$
μ_{aire}	$2 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}$
L	$6^{-5} - 3^{-3} m$
U	$0.25 \frac{m}{s}$

Tabla 2.1: Parámetros para dispersión de saliva, los valores de tamaño y velocidades son estimaciones de algunas pruebas hechas en el laboratorio de acústica y vibraciones del ICAT-UNAM.

2.3.2. Número de Stokes

En nuestra aproximación en la que consideramos a las gotas de saliva como esferas sólidas de densidad constante podemos tener dos tipos de partículas. Aquellas que siguen el flujo de aire y aquellas que no lo siguen. En este contexto algunas partículas "grandes" pueden seguir al flujo si tienen características similares a este. Una partícula no sigue al flujo si es mas pesada o ligera que este. Estas condiciones se condensan en el número de Stokes.

A bajos numeros de Reynolds ($Re < 1$) el problema de flujo uniforme alrededor de un cuerpo esférico se puede resolver de manera analítica (ver figura 2.3⁴). En nuestro caso esta condición no se cumple cabalmente, nos encontramos en la región dominada por capa límite laminar y consideramos que el número de Reynolds es bajo como una aproximación. Los cálculos que se realizan requieren que las soluciones armónicas cumplan ciertas condiciones de frontera, sin embargo, no es nuestro objetivo entrar en ese tipo de detalles, por lo que nos restringiremos a describir el parámetro adimensional que esta solución arroja y su interpretación. Dicho parámetro es conocido como número de Stokes dado por la siguiente expresión

$$S = \frac{U\rho d}{18\mu}, \quad (2.4)$$

³La densidad fue consultada en la página <https://www.motorsport.com/f1/news/why-mexicos-reduced-air-density-should-favour-a-red-bull-f1-victory/6743775/>: :text=Mexico%20City%20stands%20at%202240m,value%20of%200.96kg%2Fm3. El 23 de octubre del 2023 a las 2:24pm El valor de la viscosidad fue tomado del libro *Fluid mechanics* de White, F. M. (1990). *McGraw-Hill. Fourth edition* p. 769

⁴Tomada del libro *An introduction to fluid dynamics* de Batchelor, C. K., & Batchelor, G. K. (1967). *Cambridge university press. First paper edition* p. 231

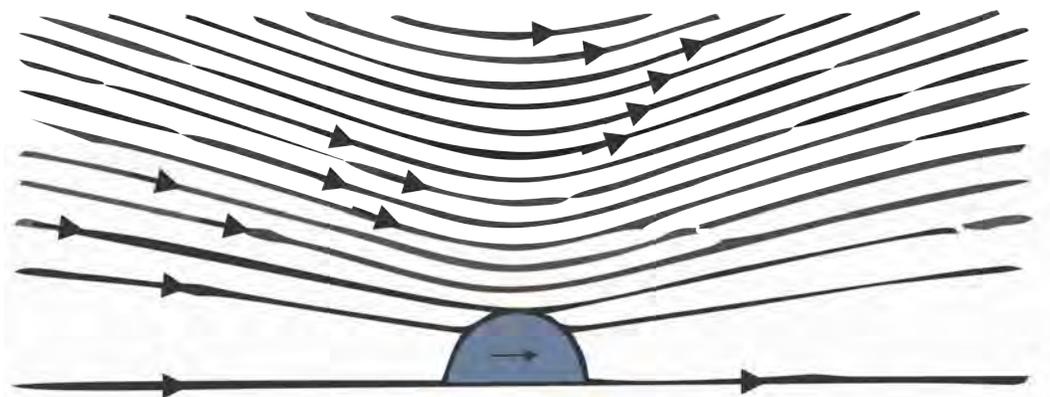


Figura 2.3: Líneas de corriente, en un plano axial, para el flujo debido a una esfera en movimiento a bajos números de Reynolds, se considera lejos de la esfera un a velocidad constante U en dirección horizontal.

donde ρ es la densidad de la partícula, d su diámetro y μ la viscosidad del fluido. En el caso en que para cierta partícula se cumpla que $S > 1$ la partícula no seguirá las líneas de trayectoria del fluido, en este caso aire. El caso contrario en que $S < 1$ las partículas seguirán las líneas de trayectoria del fluido, en este contexto este tipo de partículas son conocidas como aerosoles.

El rango de densidades de saliva está entre 1002 y 1012 $\frac{kg}{m^3}$ ⁵ muy similar a la densidad del agua. De este modo con los valores de la Tabla 2.1 para la viscosidad, y velocidad característica podemos obtener un rango de valores del número de Stokes para las gotas de saliva que se puede ver en la Figura 2.4. En dicha figura podemos observar que el diámetro crítico, es decir aquel cuyo número de Stokes es 1. De modo que las partículas que tengan un diámetro menor se quedarán suspendidas en el aire, y debido a que su dispersión por diferentes instrumentos de aliento ya ha sido estudiada, nos concentraremos en aquellas partículas cuyo número de Stokes sea mayor a uno, es decir partículas de decenas de micras en adelante.

2.4. Trayectorias balísticas con y sin arrastre

Las trayectorias que seguirán las partículas de saliva estarán bajo el efecto del campo gravitacional y también del arrastre. Sin embargo podemos tomar el tiro parabólico sin resistencia del aire como nuestro primer modelo. Este caso ideal en el que no hay disipación de energía nos da una cota superior sobre el alcance de las partículas. El caso que toma en cuenta la resistencia del aire disipando energía tendría un alcance menor. En la Figura 2.5 podemos ver los diferentes parámetros que se toman en cuenta para el tiro parabólico. Se tiene una partícula con una velocidad y ángulo de salida. El origen de coordenadas se hace coincidir con la posición de salida de la partícula. De este modo representamos al alcance

⁵Consultada en la página oficial de la NLM (*National Library of Medicine*) de Estados Unidos <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5966679/>: :text=Saliva%20density%20is%20in%20the,pH%20reaches%20about%206.2%E2%80%9336.5.

El 25 de octubre del 2023 a las 14:00hrs

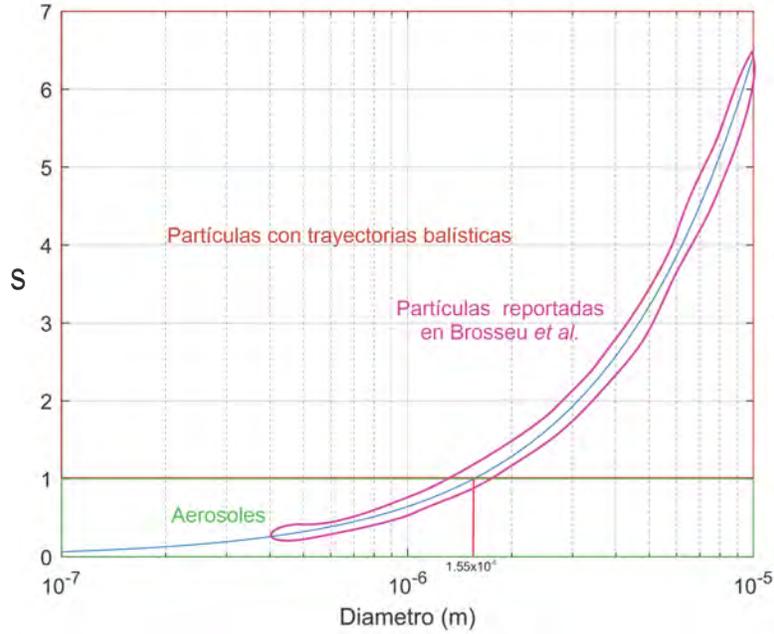


Figura 2.4: Número de Stokes para diferentes diámetros de partículas de saliva.

como la distancia horizontal máxima que la partícula alcanza con respecto al origen de coordenadas. Se toma en cuenta un movimiento rectilíneo uniforme en el eje horizontal y un movimiento uniformemente acelerado en el eje vertical. Siendo la aceleración constante, el alcance queda definido por la siguiente expresión

$$R = \frac{v_0^2}{g} \left(\text{sen}\theta + \sqrt{\text{sen}^2\theta + 2z} \right) \text{cos}\theta, \quad (2.5)$$

donde $z = gh/v_0^2$. De este modo al conocer a velocidad inicial, el ángulo de salida y la altura a la que sale la gota podemos estimar una cota superior en el alcance de las gotas de saliva. Esta expresión se obtiene en dos pasos. Primero se calcula el tiempo en que la partícula llega a una altura cero respecto al sistema de referencia. Posteriormente se sustituye este tiempo en la expresión para la posición horizontal.

Ya tenemos una cota superior para nuestro problema, sin embargo el arrastre es importante y por eso tomaremos el modelo de trayectorias de Tartaglia de Clanet [6] (2015). Estas curvas son aquellas soluciones a la ecuación balística donde el arrastre es tan importante que modifica las trayectorias parabólicas de forma significativa. En su artículo utiliza la siguiente ecuación de movimiento

$$M \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{F}_G + \vec{F}_A(\vec{U}),$$

donde M es la masa del objeto, $\vec{F}_G = M\vec{g}$ es el peso del mismo y $\vec{F}_A(\vec{U}) = \vec{F}_D + \vec{F}_L$ la fuerza aerodinámica que puede descomponerse en dos términos. La fuerza de arrastre \vec{F}_D

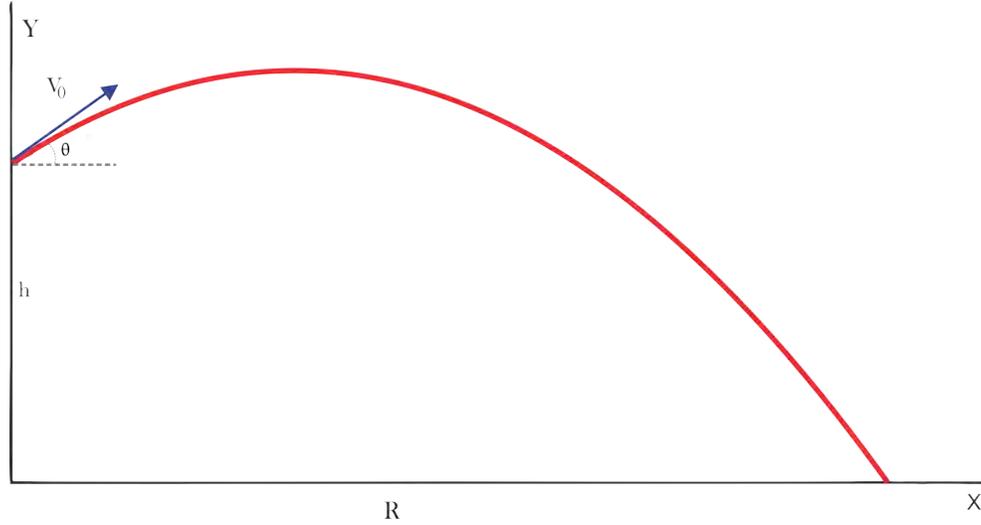


Figura 2.5: Esquema de tiro parabólico sin resistencia del aire.

paralela a la velocidad y la fuerza de sustentación \vec{F}_L perpendicular a la misma. En el caso de alas simétricas \vec{F}_L esta relacionada con el ángulo de ataque. En el caso de alas asimétricas depende también del diseño del ala. De manera analítica \vec{F}_L ha sido calculada para un cilindro que gira dentro del flujo potencial. Este resultado se le conoce como el teorema de Kutta-Joukowski.

Por ahora nos restringiremos a resolver el problema considerando solamente la fuerza de arrastre dada por la siguiente expresión

$$\vec{F}_D(\vec{U}) = -\frac{1}{2}\rho|\vec{U}|\vec{U}AC_D,$$

donde ρ es la densidad del fluido, A el área del objeto proyectada en la dirección del flujo que en este caso es la sección transversal de una esfera $A = \pi d^2/4$ y C_D el coeficiente de arrastre que para una esfera a bajos números de Reynolds toma la siguiente expresión

$$C_D = \frac{24\mu}{\rho LU} = \frac{24}{Re} \quad (2.6)$$

Con los valores obtenidos previamente calculados para el número de Reynolds y la Ecuación 2.6 se tiene que $C_D \in [16, 1600]$. Regresando a la ecuación diferencial que rige el movimiento de las partículas

$$M \frac{d\vec{U}}{dt} = M\vec{g} - \frac{1}{2}\rho|\vec{U}|\vec{U}AC_D,$$

esta es una ecuación diferencial no lineal de primer orden que bajo algunas consideraciones podemos usar para describir el comportamiento de las trayectorias. Lo primero que

⁶Tomado del libro *An introduction to fluid dynamics* de Batchelor, C. K., Batchelor, G. K. (1967). Cambridge university press. First paper edition p. 233

debemos notar es que en estado estacionario, es decir $d\vec{U}/dt = 0$ la velocidad apunta solamente en la dirección de la gravedad como se muestra en la Figura 2.6, parte 3. De este modo la solución tiene la siguiente forma $\vec{U} = U_\infty \hat{e}_y$ con $U_\infty = \sqrt{2Mg/\rho AC_D}$ conocida como velocidad terminal.

El siguiente caso que podemos tratar de manera sencilla es cuando la velocidad inicial es mucho mayor que la velocidad terminal $U_0 \gg U_\infty$. En este caso la fuerza de arrastre es significativamente mayor que la fuerza de gravedad, por lo que podemos aproximar el problema a resolver la siguiente ecuación diferencial de primer orden

$$M \frac{d\vec{U}}{ds} = -\frac{1}{2} \rho \vec{U} AC_D.$$

Hay que notar que se utiliza que $dU/dt = dU/ds ds/dt$ para cambiar la derivada temporal por la derivada en el que s se refiere al arco de curva local de la partícula. De este modo la solución toma la siguiente forma

$$\vec{U}(s) = \vec{U}_0 e^{-\frac{s}{\mathcal{L}}},$$

donde $\mathcal{L} = \frac{2M}{\rho AC_D} = \frac{U_\infty^2}{g}$ es una longitud característica que depende de las propiedades de la gota y la densidad del fluido. Esta parte de la solución es aproximada al no considerar la gravedad y se puede ver en la Figura 2.6 parte 1 como una línea recta. El parámetro en el que estamos interesados es el alcance que en Cohen et al. [7] (2014) aproximan con la siguiente expresión analítica

$$R = \frac{1}{2} \mathcal{L} \cos \theta_0 \ln \left[1 + 4 \left(\frac{U_0}{U_\infty} \right)^2 \text{sen}^2 \theta_0 \right]. \quad (2.7)$$

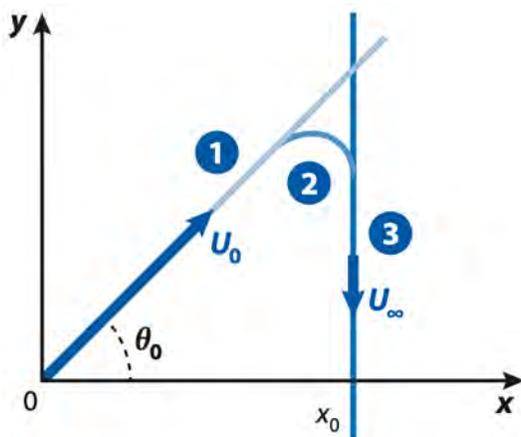


Figura 2.6: Movimiento de una partícula con resistencia del aire tomada de Clanet [6] (2015)

2.5. COVID-19 en música

Charlotte [5] (2020) documenta un caso interesante en el que 19 de 27 personas (25 coristas, un director y un acompañante) que estuvieron presentes en un ensayo de un coro resultaron contagiadas de COVID-19. El evento se llevó a cabo en un espacio cerrado no ventilado de $45m^2$ y tuvo lugar el 12 de marzo del 2020. Poco más de un mes después de que la WHO declarará el brote de COVID-19 como una emergencia sanitaria de auge internacional. Dicho estudio se llevó a cabo a través de un cuestionario que fue realizado a cada persona presente durante el ensayo para descartar la posibilidad de haberse contagiado en algún otro momento. En este caso la tasa de contagio fue del 70% causando alarma, por lo que muchos de los conciertos corales y presentaciones de orquesta sinfónica fueron cancelados en todo el mundo para evitar el contagio masivo en este tipo de eventos.

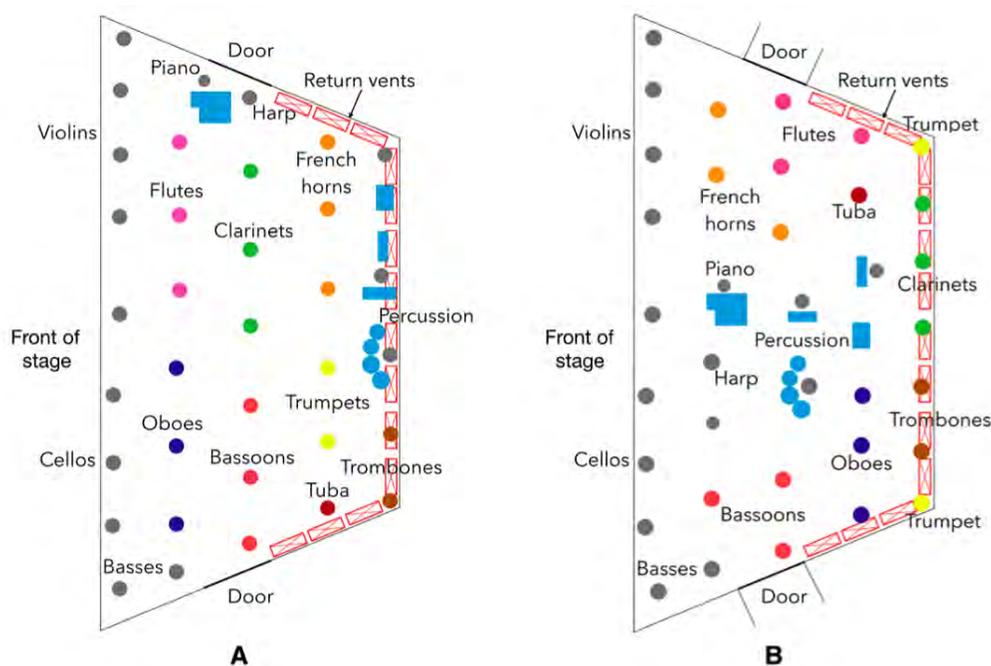


Figura 2.7: Dos diferentes arreglos de músicos de orquesta sinfónica en la sala *Abravanel Hall* en Utah EUA tomada de Hedworth *et al.* (2021) [8], Además de los diferentes arreglos entre ambas figuras, en **A** las puertas de la sala permanecen cerradas mientras que en **B** las puertas permanecen abiertas.

Hay algunos estudios que tienen una importancia relevante en el tema, pero no responden la pregunta que en este caso queremos contestar, y esta es: ¿Cuál es la distancia a la que es necesario colocarse detrás de un instrumento de aliento para no estar en contacto con las gotas de saliva que no quedan suspendidas en el ambiente?. Revisemos entonces de manera breve algunas de estas publicaciones.

Hedworth *et al.* [8] (2021) realizan un estudio sobre dos salas de conciertos en Utah, EUA. Una de ellas *Abravanel Hall* es la sala de conciertos en la que normalmente se presenta

la orquesta sinfónica de Utah. *Capitol Theater* es la sala que se utiliza mayormente para conciertos con agrupaciones pequeñas o presentaciones de coros. En este artículo se utiliza dinámica de fluidos computacional precisa de segundo orden (*second-order accurate computational fluid dynamics*) para estimar la concentración de aerosoles promedio, considerando el flujo de los diferentes instrumentos mostrados en la figura 2.7, así como los diferentes sistemas de ventilación con las que cuenta el recinto y flujos específicos de cada instrumento.

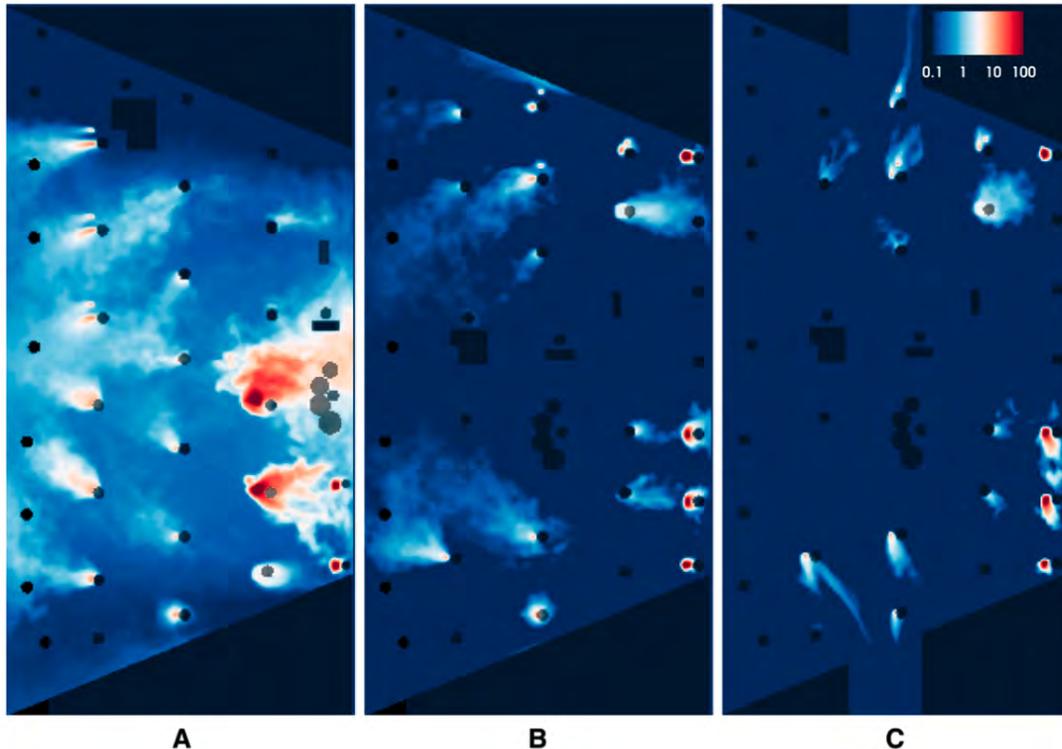


Figura 2.8: Concentración de aerosoles ($d < 5\mu\text{m}$) promediada en 20 min en el tiempo y de 0.9 a 1.3m en el espacio. La escala de colores de 0.1 a 100 esta en escala logarítmica y en partículas por litro. **A** representa el arreglo A de la Figura 2.7, **B** representa el arreglo B de la Figura 2.7 con las puertas cerradas y **C** representa el arreglo B de la Figura 2.7 con las puertas abiertas.

En la Figura 2.8 podemos ver uno de los resultados mas importantes de Hedworth *et al* [8]. para la concentración de aerosoles en la sala *Abraham Hall*: acomodar a los músicos de diferente manera (Figura 2.7B) disminuye significativamente la concentración de aerosoles, hasta cuatro ordenes de magnitud en algunas regiones.

Otro estudio interesante, en este caso experimental es el que hacen He *et al.* [9] (2021) aquí se mide con la colaboración de músicos profesionales de la Orquesta sinfónica de Minnesota la densidad y tamaño de partículas expeditas por 10 diferentes instrumentos de aliento mientras tocaban escalas ligadas y articuladas, ascendientes y descendientes (Tuba, fagot, piccolo, flauta, clarinete bajo, corno francés, clarinete trombón bajo, oboe y trompeta). A

excepción de la Tuba los instrumentos que se utilizaron para hacer las pruebas en este trabajo fueron los mismos. El instrumento que utilizan es un medidor APS (*Aerodynamical Particle Sizer* por sus siglas en inglés) que detecta partículas con diámetros que van desde 0.5 a $20\mu m$. Cabe mencionar que este tipo de sensores altera la dinámica de las gotas pues deben ser absorbidas para ser detectadas. En la Figura 2.9 podemos observar la clasificación de los diferentes instrumentos dependiendo de la densidad de partículas expedidas. Tenemos a la tuba como el único instrumento de bajo riesgo, al fagot, piccolo, flauta, clarinete bajo, corno francés y el clarinete como instrumentos de riesgo intermedio y a la trompeta, trombón bajo y el oboe como instrumentos de alto riesgo. En este caso el rango de tamaños detectado por el instrumento cae dentro de la clasificación de aerosoles.

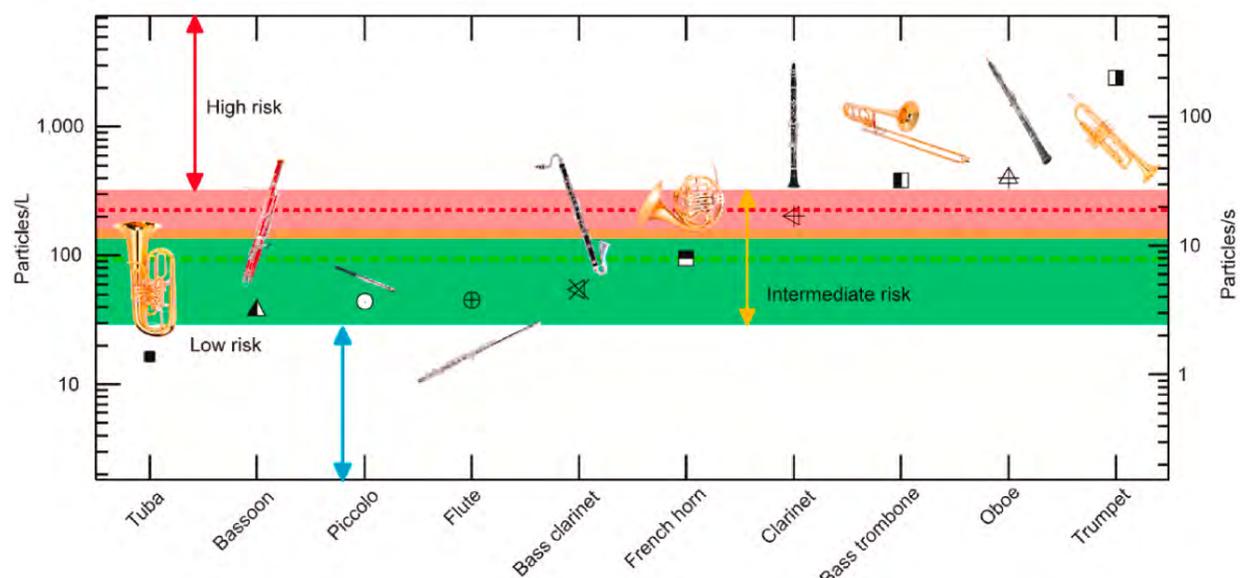


Figura 2.9: Densidad temporal y espacial de las partículas medidas por He *et al.* [9] (2021) para 10 diferentes instrumentos musicales.

Brosseau *et al.* [10] (2022) miden el número de partículas expedidas con radios de entre 0.3 a $10\mu m$ para 6 diferentes instrumentos de viento (Flauta, oboe, clarinete, fagot, trompeta y tuba), así como el campo de velocidades a la salida del instrumento utilizando Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) con niebla artificial (el arreglo experimental lo podemos encontrar en la figura 2.10). En éste trabajo se encuentra que la velocidad de salida del chorro ($\approx 0.1m/s$) es mucho menor comparada con un estornudo o un tosido ($\approx 10m/s$) y que para casi todos los instrumentos analizados el flujo decae al flujo de fondo antes de 2 m, por lo que la distancia máxima de la dispersión de aerosoles ya tiene una cota.

Lo que nos interesa entonces es una técnica de medición de trayectorias que se adapte a nuestras necesidades. Esto es una técnica que nos permita medir el tamaño y la velocidad

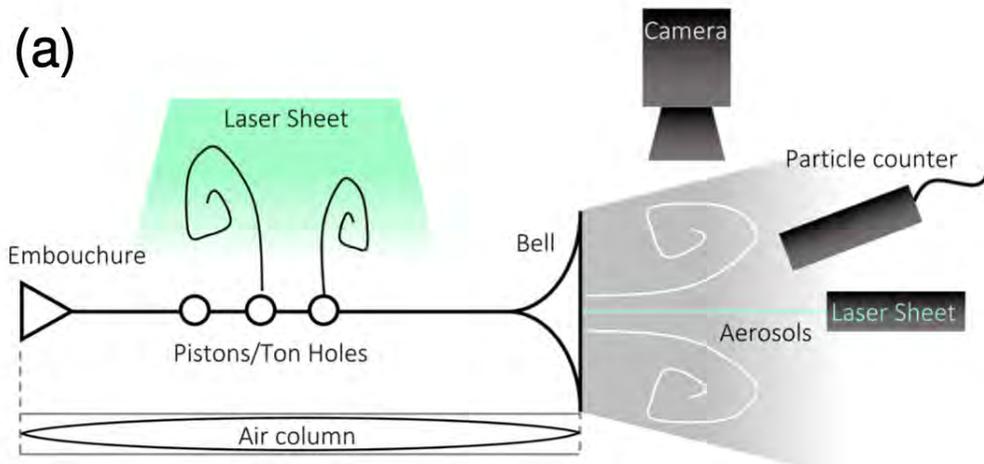


Figura 2.10: Arreglo experimental utilizado por Brosseau *et al.* [10] (2022).

puntual de las gotas con un diámetro mayor a $100\mu m$ en un espacio libre de al menos unos centímetros a la salida de diferentes instrumentos de viento. Anfinrud *et al.* [11] (2020) utilizan fluorescencia inducida por láser plano (PLIF por sus siglas en inglés), una técnica de visualización de flujos para poder observar a las partículas expedidas mientras alguien hablaba. Aunque esta técnica está restringida a observar la trayectoria de las partículas en un plano, se puede adaptar para poder observar las gotas expedidas por los diferentes instrumentos de aliento. Para ello se procedió a construir el arreglo experimental descrito en la siguiente sección.

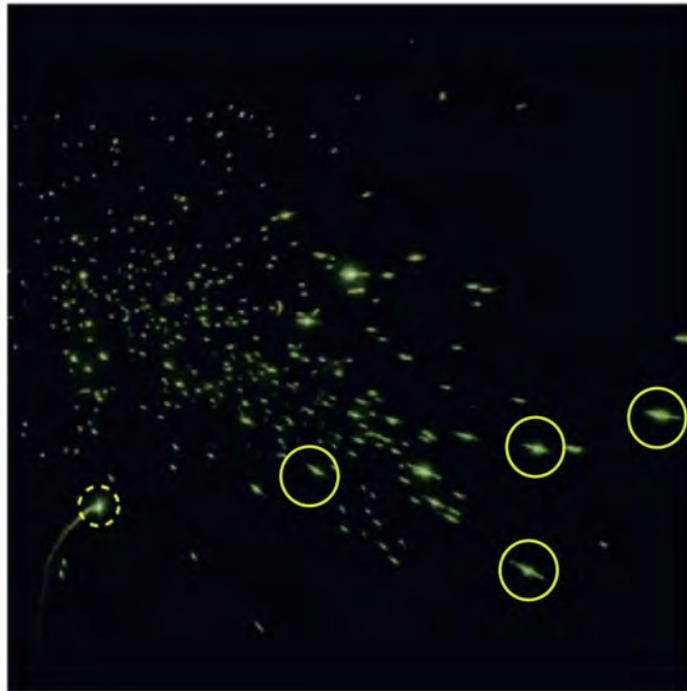


Figura 2.11: Gotas observadas con PLIF, al hablar tomada de Anfinrud *et al.* [11] (2020). Podemos observar en las partículas encerradas en amarillo que la tasa de adquisición no es suficientemente rápida para captarlas en un instante de tiempo en el que se muevan muy poco, aparentando estar en reposo. A este problema se le conoce como *motion blur*.

3 Metodología

3.1. Diseño del arreglo experimental

Las pruebas fueron realizadas con ayuda de músicos profesionales de la Orquesta Filarmónica de la Universidad Nacional Autónoma de México (OFUNAM) y de la Orquesta Sinfónica de Minería (OSM) en la cámara de reverberación del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM. Esta cámara fue cuidadosamente limpiada y un filtro HEPA fue colocado 2 días antes de cada prueba para minimizar la concentración de polvo en el recinto. También se midió con un sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2270 el nivel de presión sonora antes de comenzar cada prueba mientras el intérprete tocaba una nota en medio del registro de su instrumento en *mezzo forte* (*mf*). Aunque el objetivo de dicha cámara es crear en ella un campo sonoro reverberante, se colocaron dentro algunos paneles acústicos para disminuir el tiempo de reverberancia a modo de emular una sala de conciertos. Los instrumentos analizados a excepción de la tuba de acuerdo con He *et al.* [9] (2021) fueron: fagot, clarinete bajo, clarinete, flauta, corno francés, oboe, piccolo, trombón y trompeta.

Duración	22s
Tasa de adquisición	500fps
Resolución	1080p
Profundidad de escala de grises	16bits

Tabla 3.1: Parámetros con los que se tomaron los videos de ambas pruebas, a excepción de la duración, todos los demás parámetros fueron los mismos para la caracterización del polvo.

Con el fin de caracterizar el movimiento del polvo se grabó un video del fondo de 10s en donde no había ningún intérprete tocando y solamente aparecía el polvo sobre la hoja láser con las características mencionadas en la tabla 3.1. Posteriormente por cada intérprete se grabaron dos videos en escala de grises con una cámara Chronos 2.1 de la marca Krontech®. Los detalles para ambos videos fueron los mismos y los podemos encontrar en la Tabla 3.1. El audio también fue grabado con un celular. En uno de los videos cada músico tocó escalas ascendentes y descendentes en el registro propio de cada instrumento a diferentes niveles dinámicos (*mf* y *ff*). En el otro video uno o dos solos del repertorio orquestal fueron interpretados dentro del tiempo establecido. Esta última parte se realizó de manera distinta que en el artículo de He *et al.* [9], debido a que nos interesa analizar las trayectorias de partículas de saliva en un ambiente lo más natural posible.

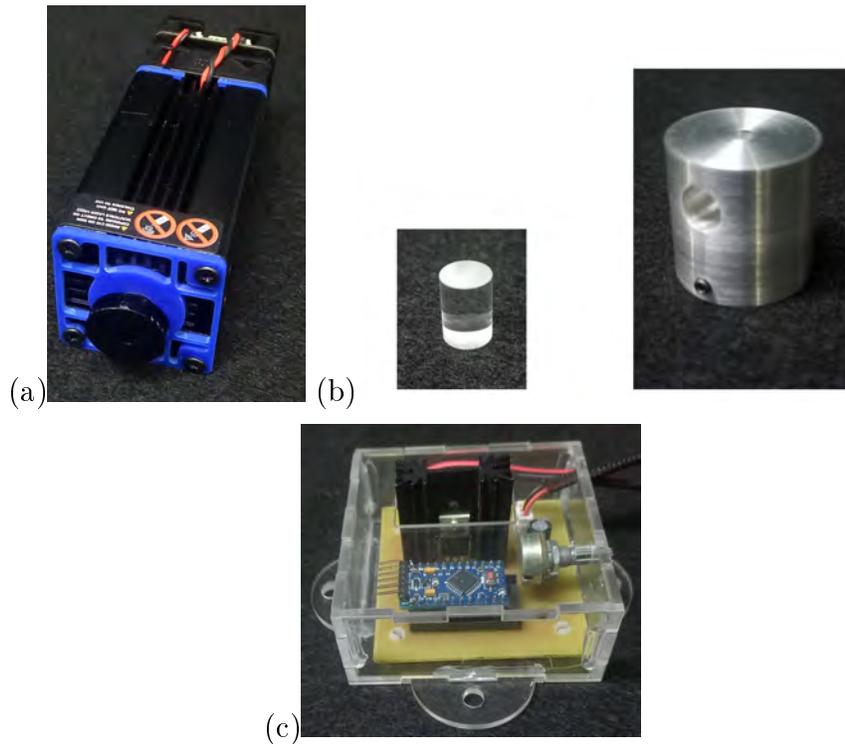


Figura 3.1: (a) Módulo de láser de grabado modificado para crear la hoja láser. (b) fotografías de la lente cilíndrica con $\phi = 7mm$ y adaptador cuyos planos se muestran en la Figura 3.2. (c) Circuito PWM ensamblado en una PCB y montado en una caja de acrílico hecha a medida.

Como ya se mencionó anteriormente se utilizó fluorescencia inducida por láser plano (PLIF por sus siglas en inglés) para visualizar las trayectorias de las partículas a la salida de cada instrumento. Para hacer el plano láser se modificó un láser de grabado azul ($\lambda \sim 450nm$) de $20W$ que se muestra en la Figura 3.1 (a). Sin embargo, este dispositivo debido a su diseño original usa solamente un lente condensador que enfoca el haz a un punto. Por esta razón se fabricó un adaptador para adaptar una lente cilíndrica de $7mm$ de diámetro a la salida. El adaptador se fabricó de aluminio ya que la intensidad del láser podría derretir un adaptador de plástico de las mismas dimensiones. Los planos y el soporte los podemos ver en las Figuras 3.2 y 3.1 (b). Este se puede quitar y poner de la salida del dispositivo mostrado en la Figura 3.1 (a) gracias al prisionero que tiene en la parte inferior. Para hacer que la hoja láser sea lo más delgada posible primero se enfoca el láser sobre la superficie en donde esta terminará y posteriormente se coloca el adaptador de la lente cilíndrica. El láser tiene un ventilador en la parte posterior que crea una corriente de aire que pasa a través de la carcasa y llega hasta la salida del haz por lo que para no inducir un flujo secundario se colocó entre el soporte de la lente cilíndrica y la salida del haz un disco de cartón que se puede ver en la Figura 3.3.

Este dispositivo también necesita ser alimentado con corriente directa y un circuito modulador de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) para poder funcionar. Dicho

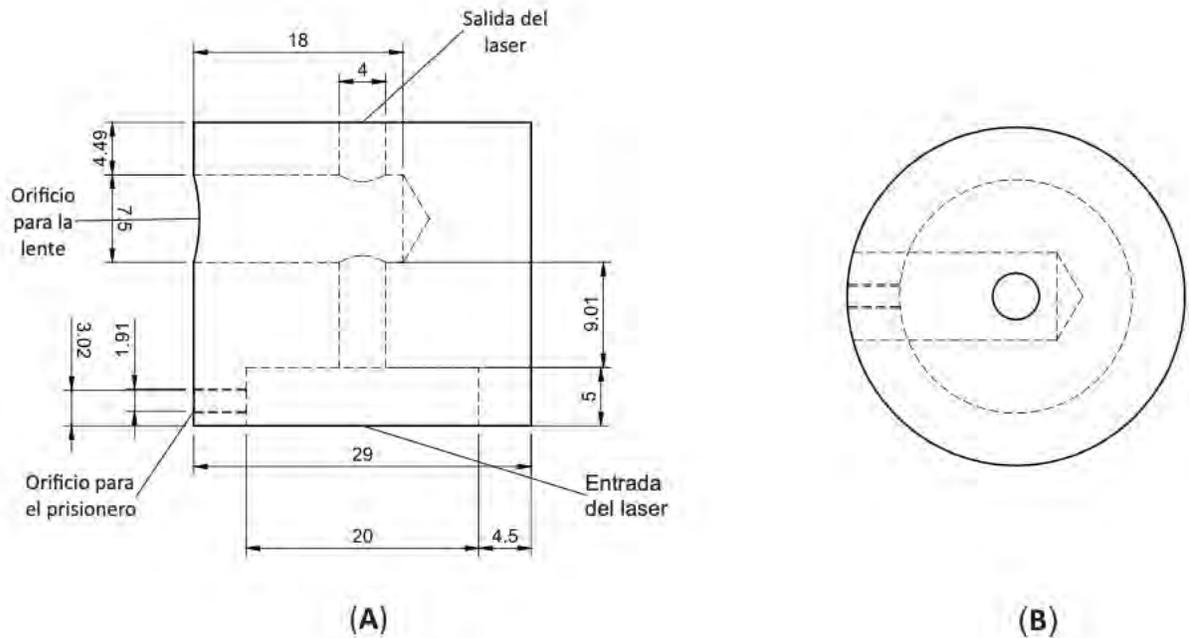


Figura 3.2: Diagrama esquemático del soporte de la lente cilíndrica. (A) muestra la vista lateral y (B) la vista superior. Las medidas están en milímetros.

circuito modula la potencia y fue programado en un Arduino Pro Mini. Este microcontrolador, un potenciómetro y otros elementos fueron ensamblados en una PCB en el arreglo que se muestra en la Figura 3.1 (c).

Posteriormente se fija el módulo láser modificado al final en un brazo mecánico móvil que se puede ajustar de forma manual para poder dirigir la hoja hacia nuestra área de interés (distinta para cada instrumento). Este brazo está sostenido por dos rieles de aluminio, de modo que la posición vertical de puede ajustar deslizando. Ambos rieles están fijos a una mesa en la que se coloca la fuente de alimentación de corriente directa y el circuito PWM. En la figura 3.3 podemos ver todos los elementos que forman el arreglo experimental.

Una de las variables importantes que se debe considerar es la altura h que se muestra en la Figura 2.5, la altura media del pabellón del instrumento al suelo. La Tabla 3.2 contiene dicho valor aproximado para cada instrumento. Además las Figuras 3.4 y 3.5 muestran una representación gráfica.



Figura 3.3: Arreglo experimental PLIF previo a una medición con la flautista. El sonómetro (A) se utiliza para calibrar el nivel de presión sonora de *forte* y *mezzo forte*. (B) Módulo láser modificado para implementar la técnica PLIF. (C) Cámara de alta velocidad siendo enfocada.

Instrumento	$h(cm)$
Clarinete	50
Clarinete Bajo	20
Corno francés	80
Fagot	120
Agujeros del fagot	80
Flauta	110
Pie de flauta	110
Oboe	60
<i>Piccolo</i>	110
Trombón	110
Trompeta	100

Tabla 3.2: Alturas aproximadas del punto de producción de gotas de saliva.

Se necesita una corrección a la altura y al alcance tomando en cuenta la posición inicial de cada rastreo y la posición del pabellón del instrumento en cada video. Siendo h' la altura que se considerará en la Ecuación 2.5, por lo que nos entregara el valor R' . Sin embargo el valor importante a reportar es R . Tomando en cuenta la Figura 3.6 con el origen de coordenadas

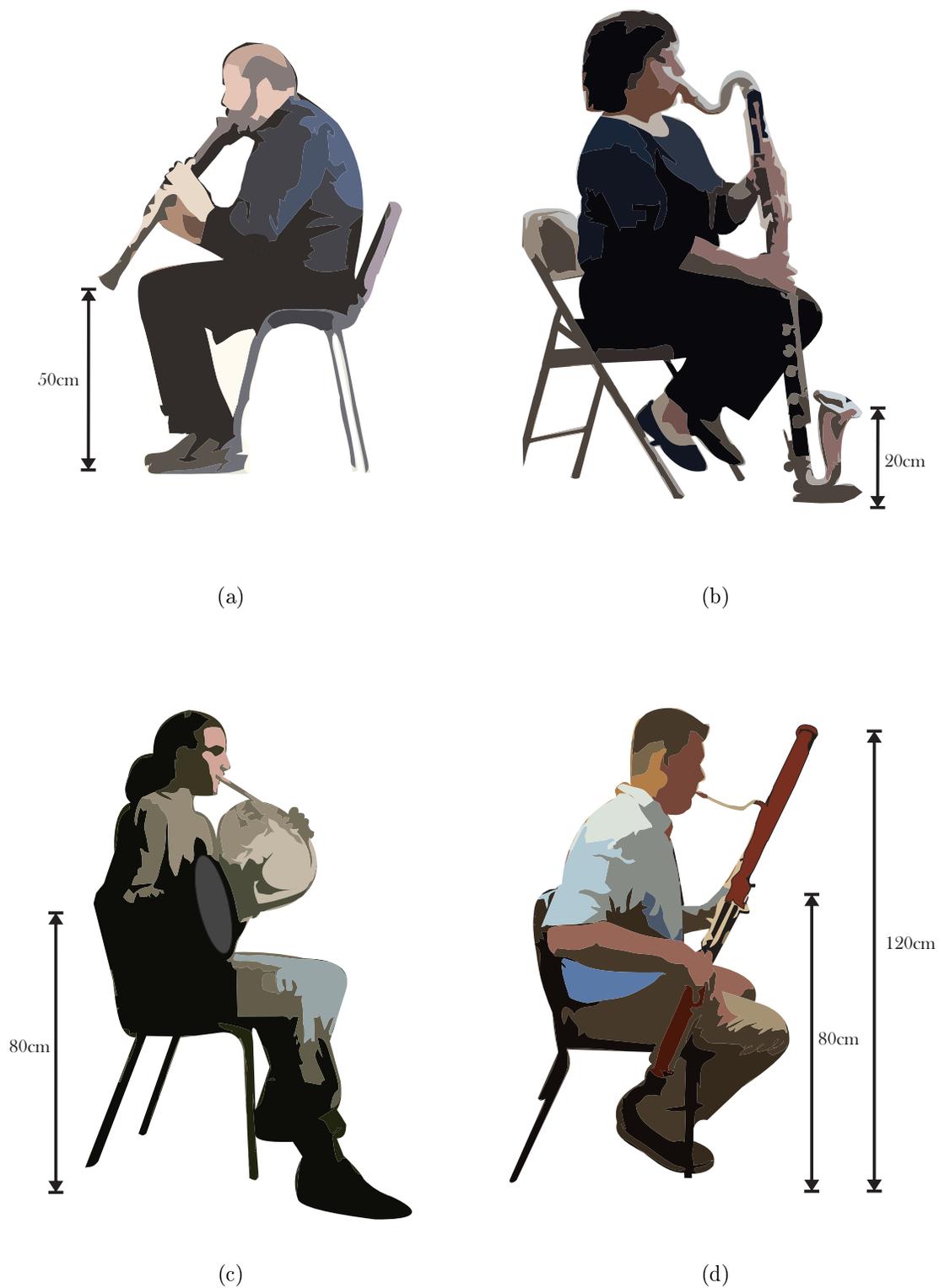


Figura 3.4: Esquemas de diferentes intérpretes ((a) clarinete, (b) clarinete bajo, (c) corno francés y (d) fagot).

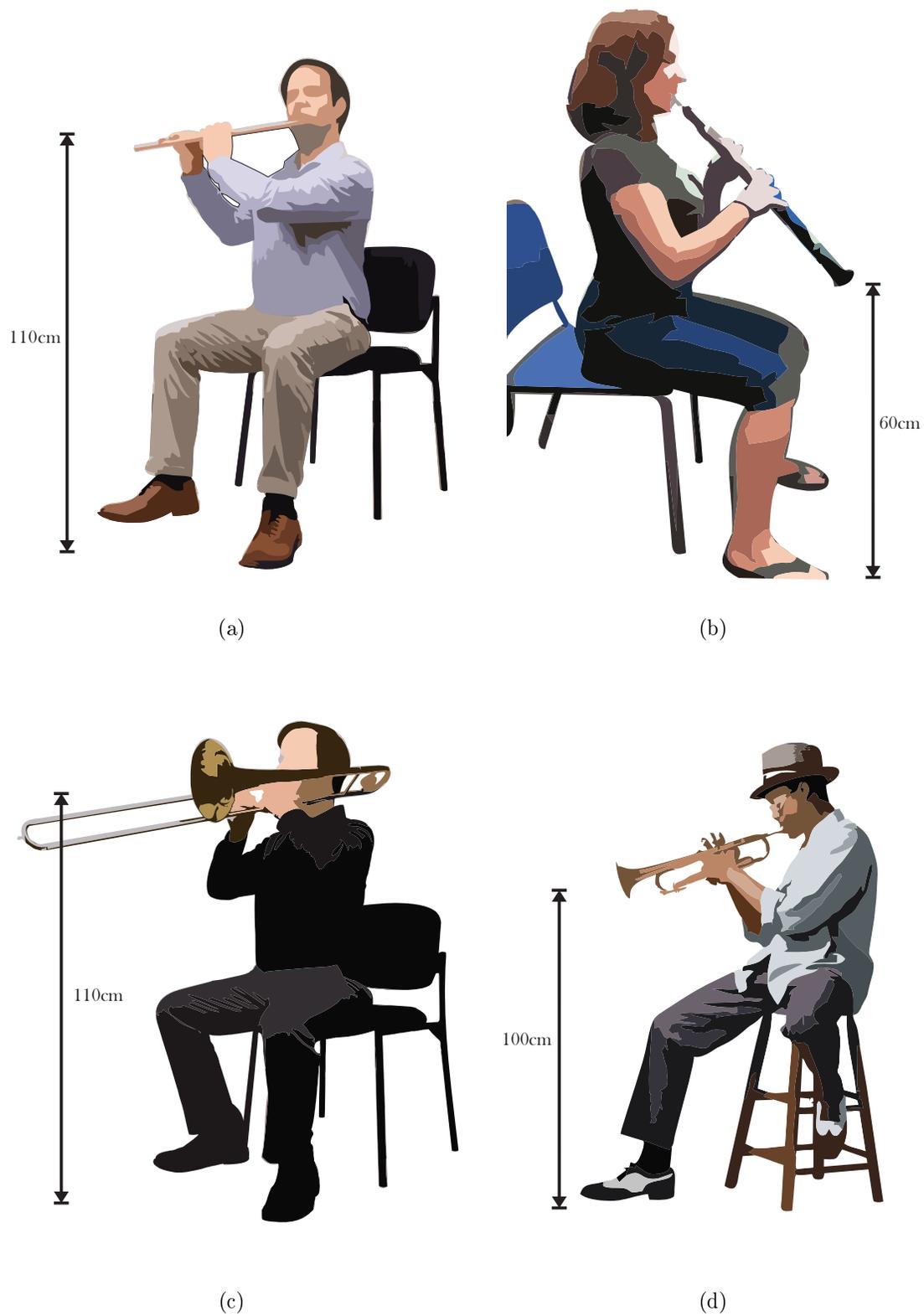


Figura 3.5: Esquemas de diferentes intérpretes ((a) flauta, (b) oboe, (c) trombón y (d) trompeta).

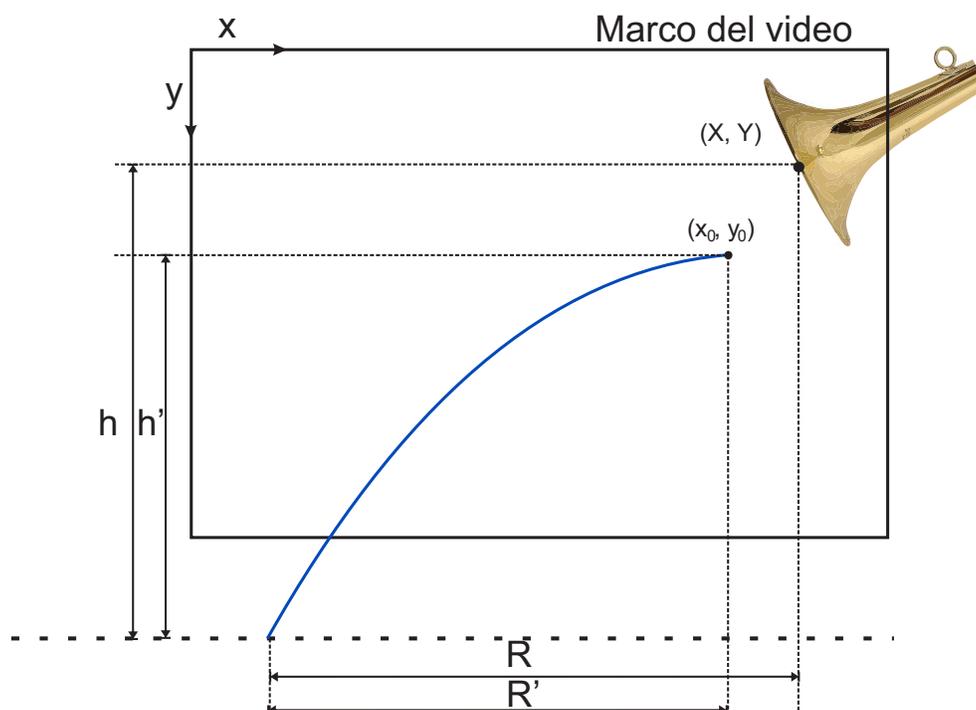


Figura 3.6: Esquema que muestra la corrección que hay que hacer a la altura h y el alcance R considerando la posición inicial de la gota y la posición del pabellón.

en la esquina superior izquierda y con todas las longitudes en la misma unidad tendremos las siguientes expresiones.

$$h' = h - (Y - y_0) \quad (3.1)$$

y

$$R = R' + (X - x_0) \quad (3.2)$$

3.2. Protocolo para hacer las pruebas

Por cada instrumento se grabaron dos ejercicios, ambos videos fueron grabados en una sola sesión de aproximadamente hora y media para cada músico. El filtro HEPA fue colocado en la cámara reverberante 2 días antes de cada prueba. También se les pidió a los músicos y a las personas que estaban dentro de la cámara durante las pruebas que no utilizaran ropa afelpada (como algodón o lana) que pudiera dejar partículas de polvo y que utilizaran cubre bocas durante todo el procedimiento. Ambos fueron requerimientos para minimizar los efectos del polvo o gotas de saliva al respirar, hablar, etc. También se les proporcionaron lentes protectores para evitar que los reflejos del láser pudieran dañar sus ojos.

Antes de comenzar a grabar se le pidió a cada intérprete que calentara su instrumento y que se asegurara de que estuviera bien húmedo, por dos razones. La primera es que al igual que antes de empezar un concierto el músico comienza tocando algunos arpeggios o segmentos de melodías para que el aire dentro del instrumento se caliente y este afinado a la temperatura interna de la columna de aire. La segunda razón es que probablemente al estar bien húmedo se favorecería la producción de gotas de saliva.

El primer video que se grabó con todos los intérpretes fue aquel donde tocaban escalas ascendentes y descendentes. La primera mitad del tiempo establecido los intérpretes tocaron una escala ascendente y posteriormente la misma en sentido opuesto en una parte del registro propio de cada instrumento en *mf* y el tiempo restante el mismo arreglo pero en *ff*. El nivel dinámico no es absoluto ya que el nivel de presión sonora suele variar entre instrumentos distintos tocando por ejemplo en *f* e incluso entre dos intérpretes del mismo instrumento. Por esa razón se realizó la medición del nivel de presión sonora antes de empezar a grabar mientras el intérprete sostenía una nota en *mf*. En la Tabla 3.3 podemos ver el valor medido para cada instrumento. Debido a que cada video se grabó en alta definición a 16 *bits* de profundidad de pixel, con alrededor de 11,000 cuadros por video, cada uno tenía un tamaño de alrededor de 40GB. El tiempo en que la cámara transfería los datos a un disco duro de estado sólido era de aproximadamente 20 minutos. En ocasiones los reflejos de instrumentos con pabellones metálicos impedían ver con claridad la trayectoria de las gotas de saliva por lo que hubo que pegar cinta adhesiva negra opaca a las partes más brillantes de los instrumentos en nuestra área de interés (normalmente el pabellón) y repetir la grabación varias veces. En total tomando todas estas consideraciones tomó aproximadamente 45 minutos grabar y guardar cada video.

En el segundo video se les pidió a los músicos que tocaran uno o dos solos del repertorio orquestal en el tiempo establecido. En la Tabla 3.3 podemos ver la melodía que se interpretó por cada instrumento. Al igual que en el primer video se les pidió que intentaran tocar sin mover demasiado su instrumento para evitar reflejos y para que nuestra área de interés no saliera del marco en que se grababa.

Instrumento	Nivel de presión sonora (dB)	Melodías interpretadas	Autor
Fagot	82.5	<i>Sexta Sinfonía</i>	<i>Tchaikovsky</i>
		<i>Bolero</i>	<i>Ravel</i>
Clarinete Bajo	82.5	<i>Don Quijote</i>	<i>Strauss</i>
		<i>Sinfonía Manfreda</i>	<i>Tchaikovsky</i>
Clarinete	91.3	<i>Scheherazade</i>	<i>Rimsky-Korsakov</i>
		<i>Pedro y el Lobo</i>	<i>Prokofiev</i>
Flauta	85.2	<i>Carmina Burana</i>	<i>Orff</i>
Corno frances	86.9	<i>Primera Sinfonía</i>	<i>Mahler</i>
		<i>Quinta Sinfonía</i>	<i>Shostakovich</i>
Oboe	81.8	<i>Carmen</i>	<i>Bizet</i>
		<i>Serenata en Mi bemol</i>	<i>Mozart</i>
Piccolo	95.0	<i>Carmina Burana</i>	<i>Orff</i>
Trombon	104.7	<i>Tercera Sinfonía</i>	<i>Mahler</i>
		<i>Preludio al Tercer Acto de Lohengrin</i>	<i>Wagner</i>
Trompeta	93.5	<i>Cuadros de una Exposición</i>	<i>Mussorgsky</i>
		<i>Los Pinos de Roma</i>	<i>Respighi</i>

Tabla 3.3: Niveles de presión sonora en *mf* y melodías interpretadas.

3.3. Velocimetría por rastreo de partículas (*Particle Tracking Velocimetry*)

Antes de hacer el rastreo PTV fue necesario procesar las imágenes en dos etapas. Primero se convirtieron las imágenes a 8 bits debido a que el software necesita cargar las imágenes a la memoria RAM y tener al menos la mitad de la misma libre para hacer el rastreo. Estuvimos limitados a utilizar 32GB. Al hacer la conversión pasamos de aproximadamente un video de 40GB a uno de aproximadamente 6GB. Debido a que el sensor de la cámara guarda las imágenes en 12 bits y el formato Tiff tiene contenedores de solamente 8 y 16 bits fue necesario ajustar el brillo. Sin este ajuste las imágenes se veían completamente negras.

Se utilizó el *plugin TrackMate* de *FIJI* (*FIJI is just ImageJ*) para implementar la técnica de velocimetría por rastreo de partículas. La técnica PTV consiste en dos algoritmos principales unos para la detección de partículas individuales y otro para la unión de posiciones en trayectorias. El primero detecta las partículas en cuadros individuales. En este caso se utilizó el algoritmo *LoG* (*Laplacian of Gaussian*) [12] para todos los rastreos. Este detector utiliza dos parámetros, el diámetro estimado de las partículas en píxeles y el umbral de una variable llamada *Quality*. Esta última variable es estimada por el propio detector para cada

Parámetro para <i>LoG detector</i>	Valor
Diámetro	6 píxeles
Umbral de Calidad	20
Parámetro para Kalman Tracker	Valor
Radio inicial de búsqueda	10 píxeles
Radio máximo de búsqueda	15 píxeles
Umbral en el tiempo	15 cuadros

Tabla 3.4: Parámetros que utiliza *TrackMate* para hacer la detección y el rastreo. La forma en la que se seleccionan dichos parámetros es probando con valores diferentes y seleccionando aquellos para los cuales se observen mejores resultados.

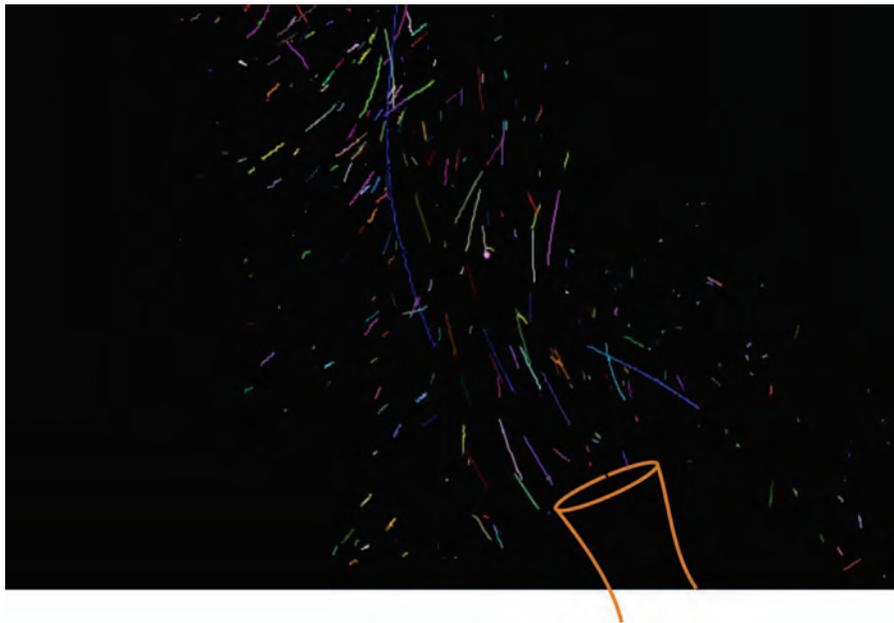


Figura 3.7: Partículas rastreadas del video de la melodía del fagot.

partícula y mide la calidad de la detección individual con un valor de 0 a 100, donde 100 es buena calidad y 0 es mala. El valor que se le da al programa es aquel a partir del cual se discriminaran las partículas detectadas.

El segundo proceso une las posiciones de las partículas detectadas en las trayectorias entre los cuadros individuales. Para todos los rastreos se utilizó el algoritmo *Kalman tracker* [13]. Este utiliza 3 parámetros, un radio inicial de búsqueda que define que tan lejos pueden estar dos puntos para iniciar una nueva trayectoria, un radio máximo de búsqueda que define que tan lejos debe buscar al punto anterior en los siguientes cuadros (ambos en píxeles) y una brecha de cuadros que define hasta cuantos cuadros adelante se puede buscar cada partícula. Los parámetros utilizados en ambos procesos los podemos ver en la Tabla 3.4.

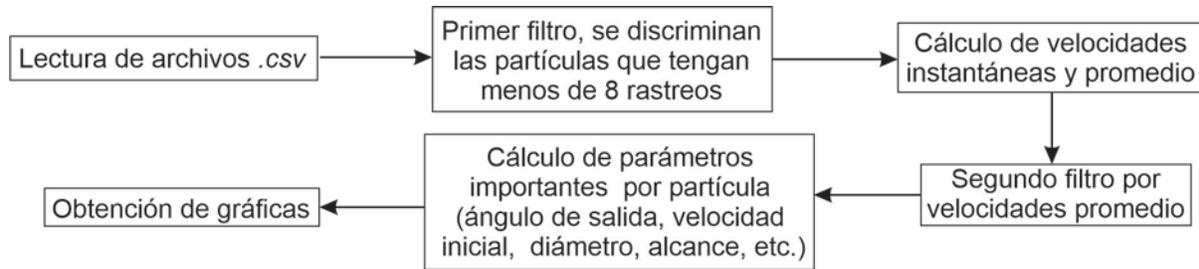


Figura 3.8: Resumen del procesamiento de datos en *Matlab R2022b*.

Al final el *plugin* crea un archivo *.csv* que tiene formato de tabla. En la tabla se asigna una etiqueta y un número para cada partícula detectada con su posición en x y en y , el cuadro en el que aparece, la variable *Quality* para cada punto y el radio de la partícula. Sin embargo este algoritmo de PTV no es bueno para calcular el tamaño de las partículas por lo que se escribió otro algoritmo en *Matlab R2022b* para estimar estos tamaños. La Figura 3.7 muestra algunas trayectorias con los valores mostrados en la Tabla 3.4.

3.4. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó en *Matlab R2022b*, el código con la descripción detallada del mismo se pueden encontrar en el apéndice C. En la Figura 3.8 podemos ver un diagrama que muestra el resumen del código.

4 Resultados

La primera parte de los resultados se resume en dos imágenes independientes para cada ejercicio e instrumento. En la primera imagen mostramos puntos que corresponden a las componentes de la velocidad de cada partícula de polvo. En los ejes horizontal y vertical tenemos componentes de la velocidad horizontal y vertical, respectivamente. Como la velocidad de las partículas no es constante, cada punto corresponde al cálculo de la velocidad media. En la segunda imagen se muestra el máximo perfil de intensidades (MPI) para cada ejercicio realizado. EL MPI se calcula encontrando el máximo valor de intensidad por pixel sobre todo el video. De esta manera las trayectorias de las partículas se observan como líneas blancas en la imagen resultante. Usamos el criterio definido por las velocidades de partículas de polvo en la Figura 4.1 para descartar velocidades menores a 25 cm/s en cualquier dirección. De esta manera las partículas de polvo se superponen al MPI de color rosa, mientras que las gotas se observan en rojo. Al final en la Sección 4.12 se muestra el diámetro de las partículas rastreadas, y su alcance calculado con el modelo de tiro parabólico, además del número de gotas encontrado por cada instrumento.

En la Figura 4.1 se presenta una distribución típica de las velocidades horizontales y verticales de partículas de polvo. Este rastreo se realizó sobre un video en el que solamente se grabó polvo moviéndose sobre la hoja láser sin ningún intérprete. Así proponemos que las partículas expulsadas de los instrumentos deben tener una velocidad mayor al polvo para poder ser cuantificadas como gotas. Es así que la Figura 4.1 se utiliza como un criterio discriminante.

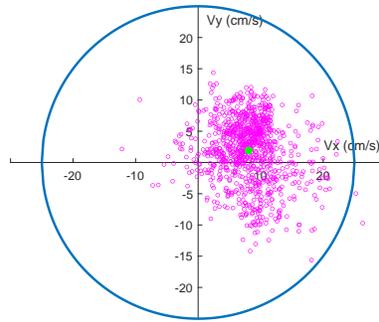


Figura 4.1: Dispersión de velocidades promedio para el polvo en las condiciones de medición. El círculo azul tienen un diámetro de 25 cm/s englobando el 99.8% de las partículas. El centroide en V_x y V_y se resalta en verde. No se encuentra centrada en cero porque el láser induce una velocidad media debida a convección en la zona cercana a la salida del mismo.

4.1. Clarinete

El clarinete consta de un resonador recto y es por esto que probablemente haya mayor expulsión de gotas de saliva (ver Figura 3.4 (a)), pues existen menos obstáculos en donde podrían detenerse.

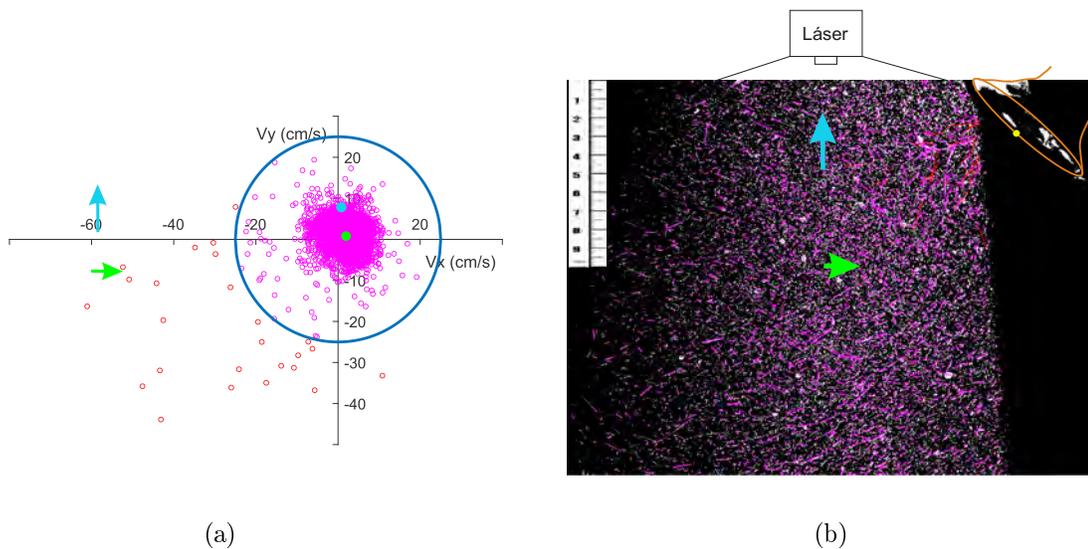


Figura 4.2: Gráficas obtenidas para el clarinete mientras tocaba fragmentos de *Scheherazade* de *Rimsky-Korsakov* y *Pedro y el lobo* de *Prokofiev*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

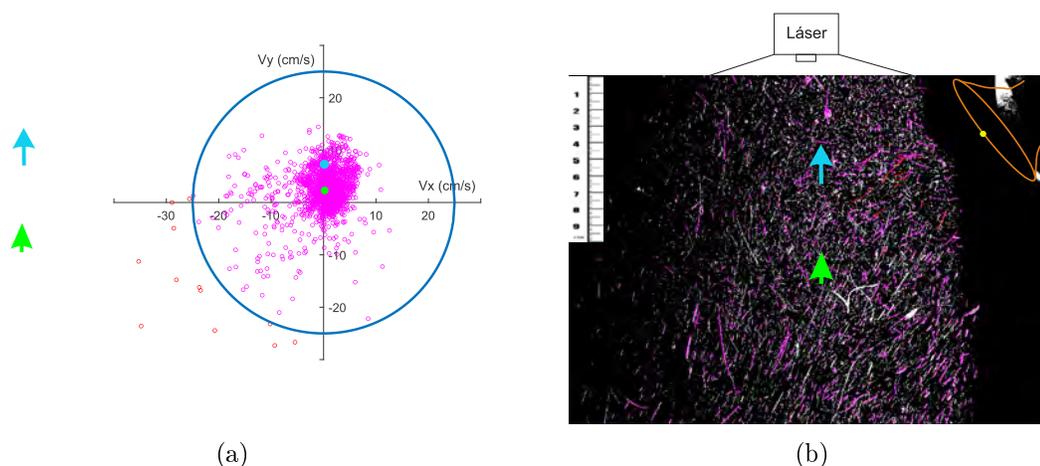


Figura 4.3: Gráficas obtenidas para el clarinete mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

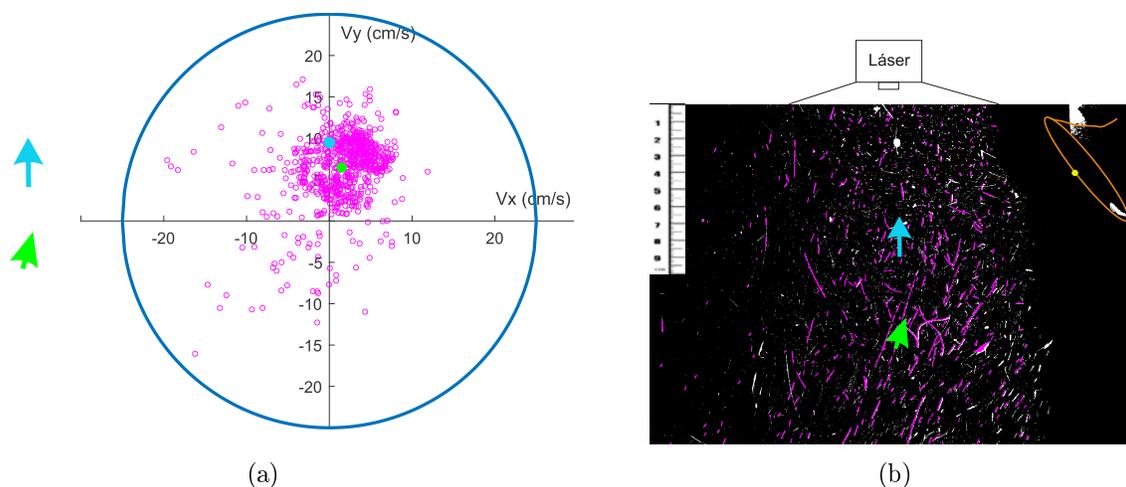


Figura 4.4: Gráficas obtenidas para el clarinete mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.2. Clarinete bajo

Este instrumento consta de un resonador recto al igual que el clarinete que se inclina hacia abajo, sin embargo después de la boquilla y antes del pabellón tiene dos curvas (ver Figura 3.4 (b)).

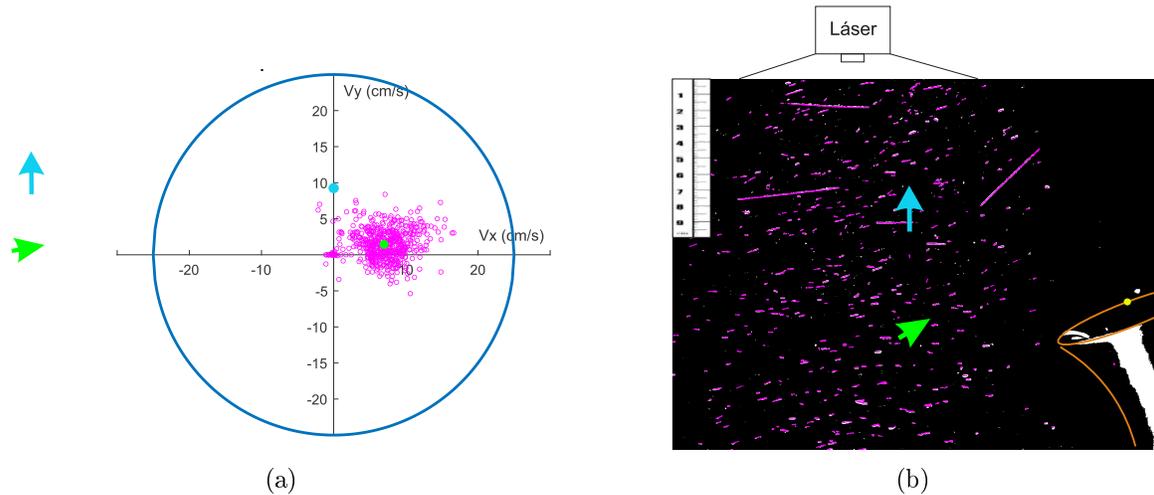


Figura 4.5: Gráficas obtenidas para el clarinete bajo mientras tocaba fragmentos de *Don Quijote* de *Strauss* y *Sinfonía Manfred* de *Tchaikovsky*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

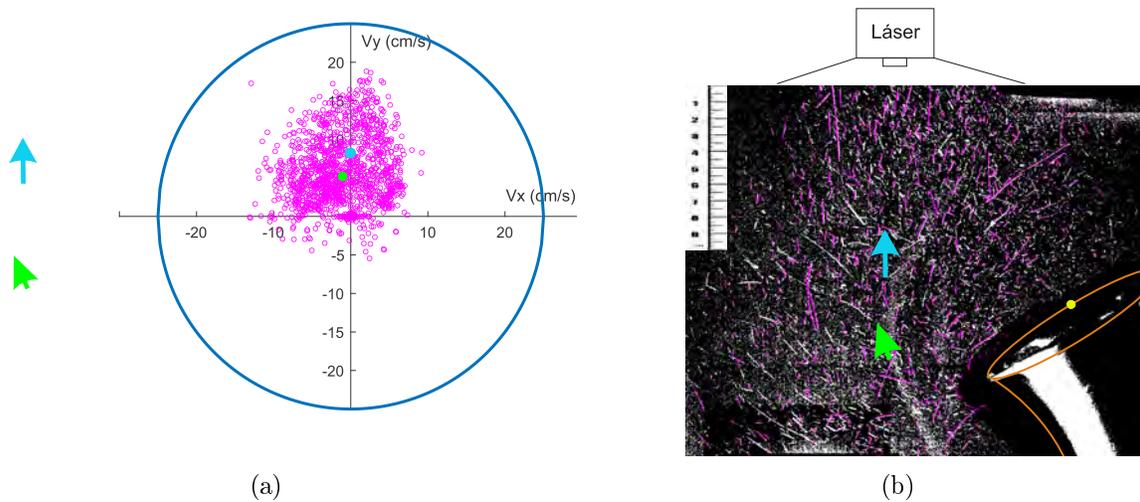


Figura 4.6: Gráficas obtenidas para el clarinete bajo mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

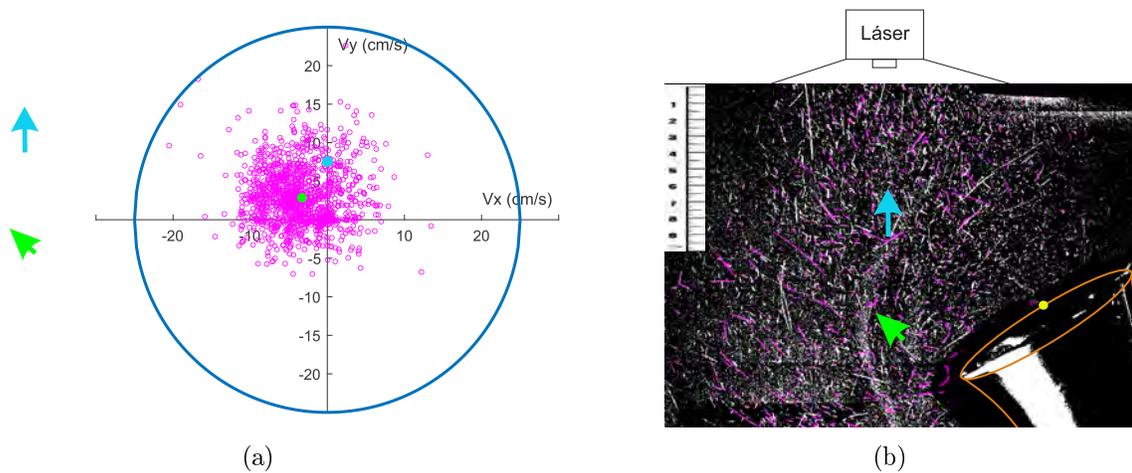


Figura 4.7: Gráficas obtenidas para el clarinete bajo mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.3. Corno francés

Este instrumento consta de un resonador con varios codos. El modo de ejecutarse consiste en meter una mano en el pabellón del instrumento. (ver Figura 3.4 (c))

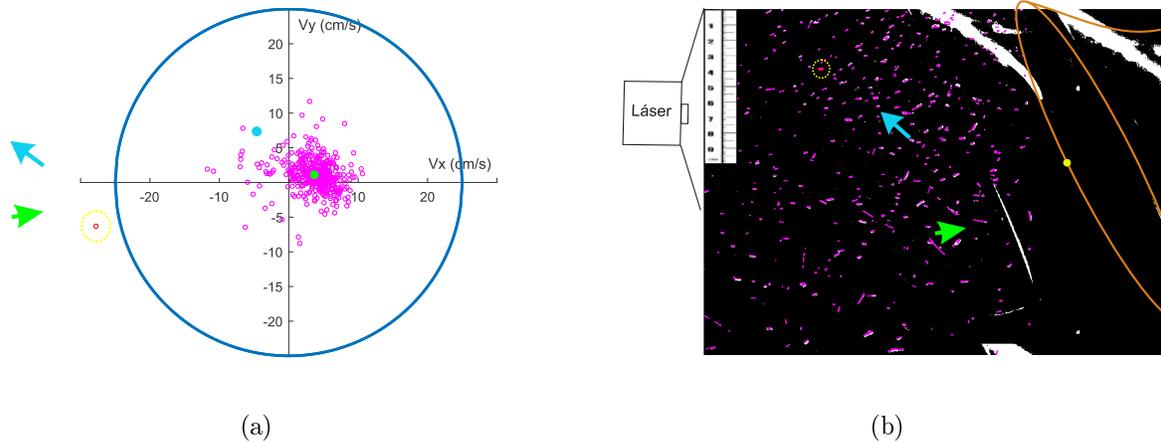


Figura 4.8: Gráficas obtenidas para el corno francés mientras tocaba fragmentos de *Primera Sinfonía* de Mahler y *Quinta Sinfonía* de Shostakovich. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

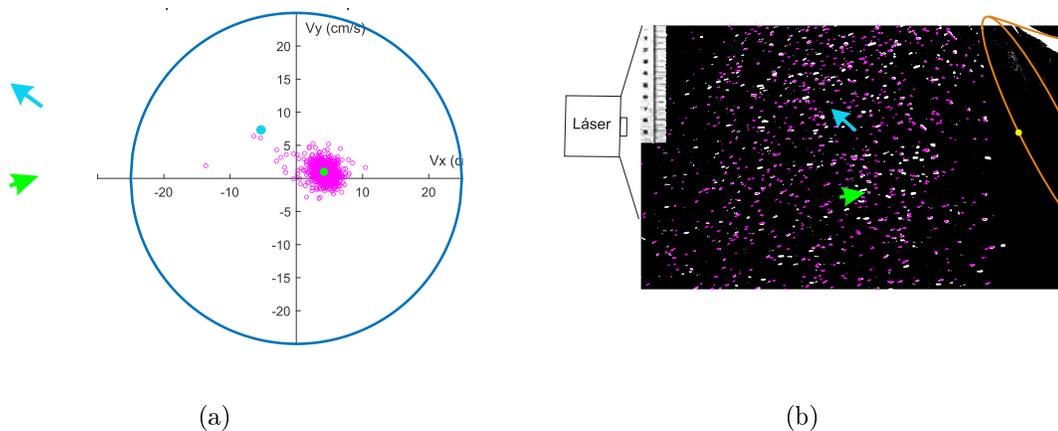


Figura 4.9: Gráficas obtenidas para el corno francés mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

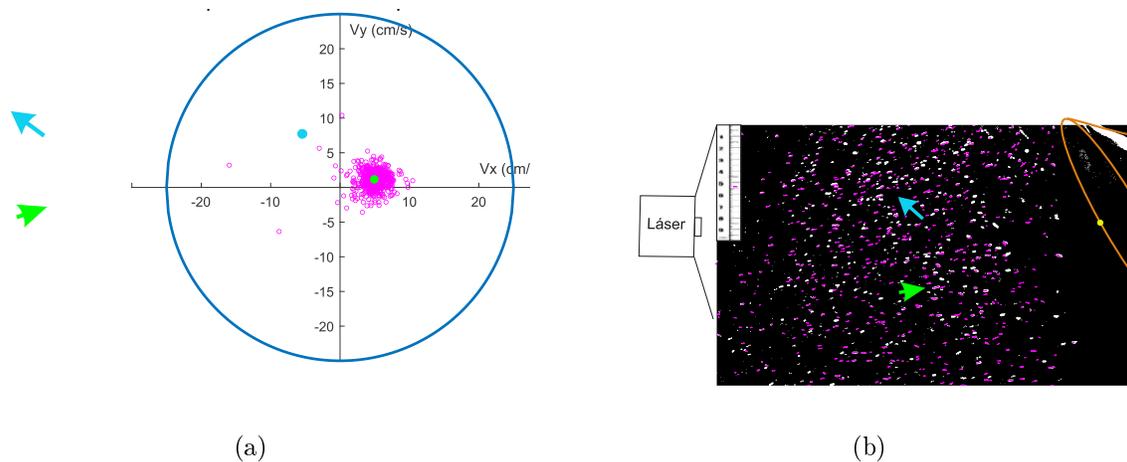


Figura 4.10: Gráficas obtenidas para el corno francés mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.4. Fagot

El esquema de este instrumento lo podemos ver en la Figura 3.4 (d). El pabellón no es la única parte del instrumento por donde pueden ser expulsadas gotas de saliva. También lo son los agujeros en donde el músico coloca su mano izquierda.

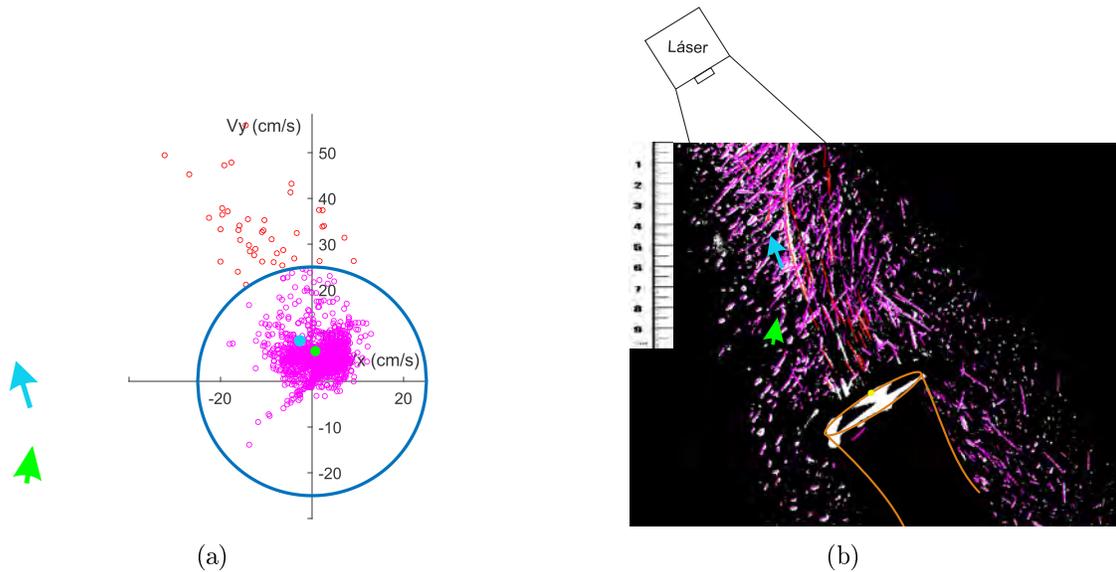


Figura 4.11: Gráficas obtenidas para el fagot mientras tocaba fragmentos de *Tercera Sinfonía* de Mahler y *Preludio al Tercer Acto de Lohengrin* de Wagner. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

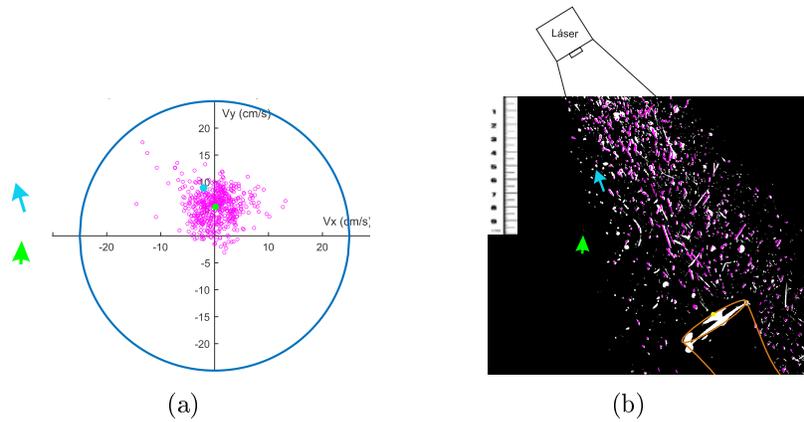


Figura 4.12: Gráficas obtenidas para el fagot mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

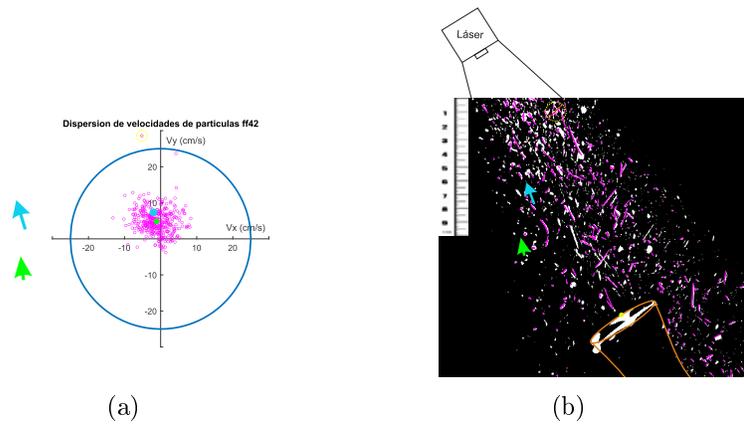


Figura 4.13: Gráficas obtenidas para el fagot mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.5. Agujeros del fagot

El pabellón del fagot no es el único orificio por donde pueden ser expulsadas gotas de saliva. Se hicieron las mismas pruebas para dos orificios que el interprete cubre con el dedo medio e índice de la mano izquierda.

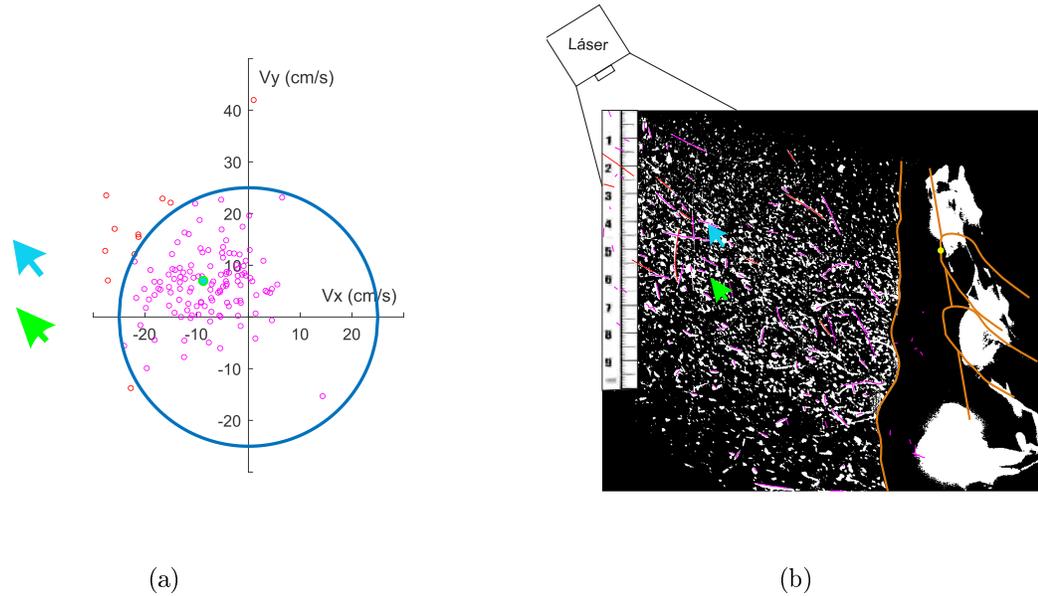


Figura 4.14: Gráficas obtenidas para los agujeros del fagot mientras tocaba fragmentos de *Tercera Sinfonía* de Mahler y *Preludio al Tercer Acto de Lohengrin* de Wagner. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

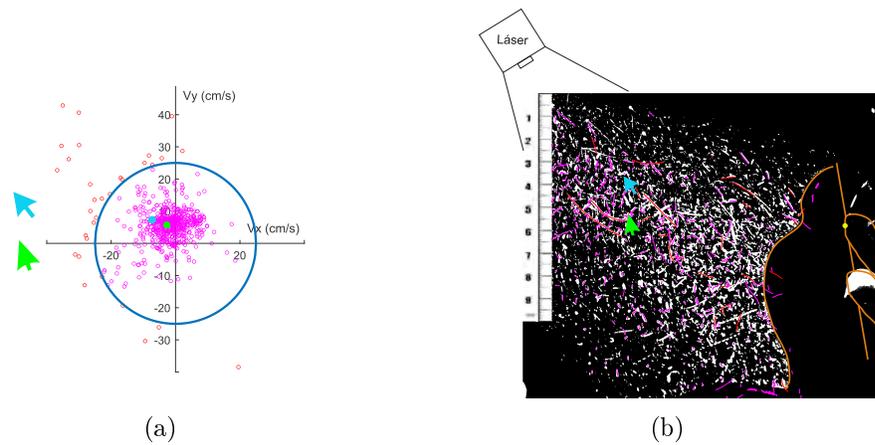


Figura 4.15: Gráficas obtenidas para los agujeros del fagot mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

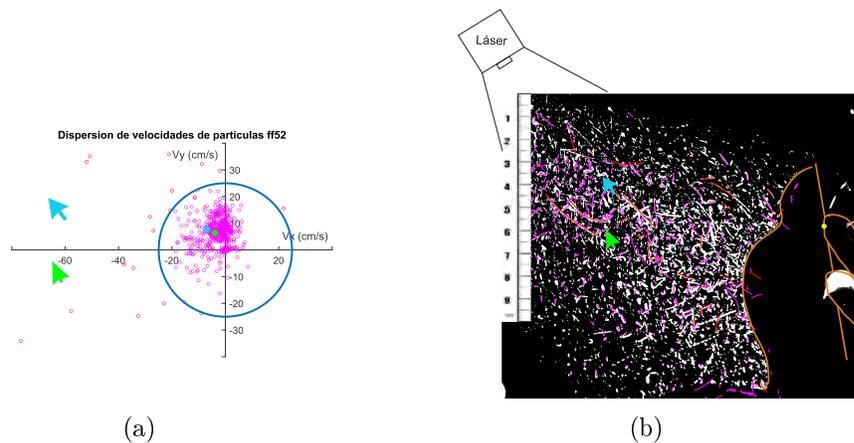


Figura 4.16: Gráficas obtenidas para los agujeros del fagot mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.6. Flauta

El esquema de este instrumento lo podemos ver en la Figura 3.5 (a), en este caso la expulsión de saliva puede ocurrir tanto por el bisel como por el pie de la flauta.

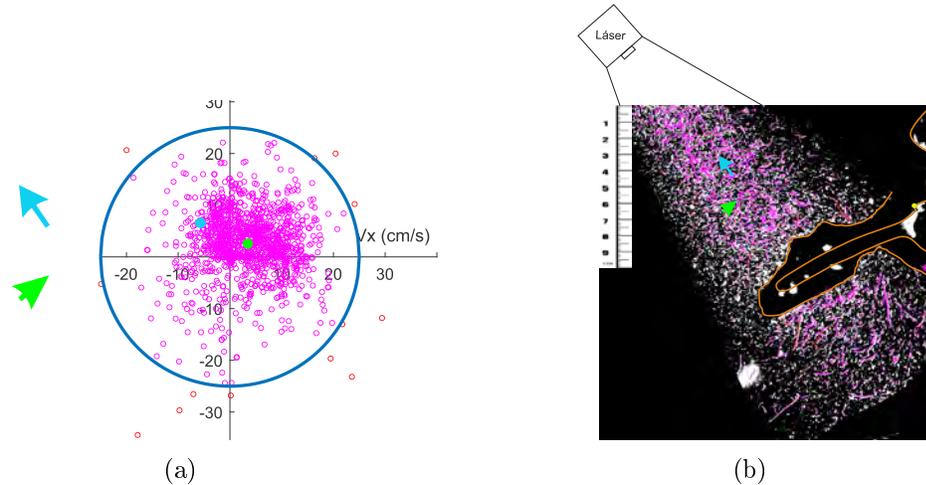


Figura 4.17: Gráficas obtenidas para la flauta mientras tocaba un fragmento de *Carmina Burana*, de *Orff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

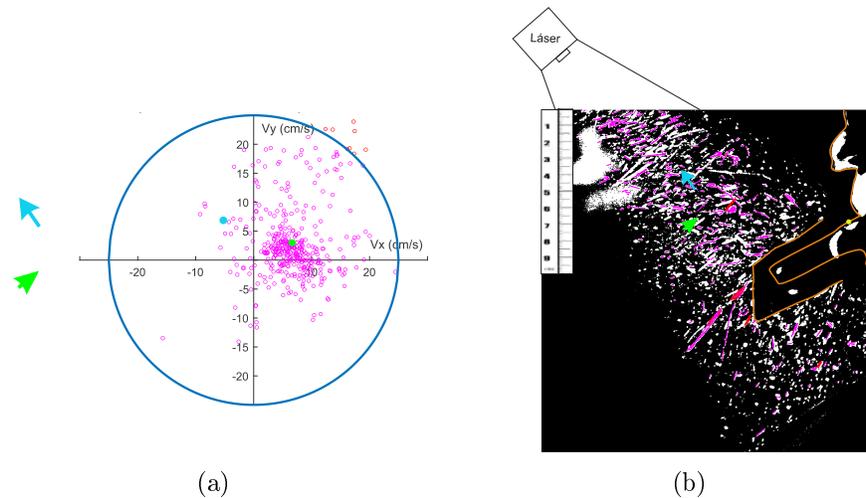


Figura 4.18: Gráficas obtenidas para la flauta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

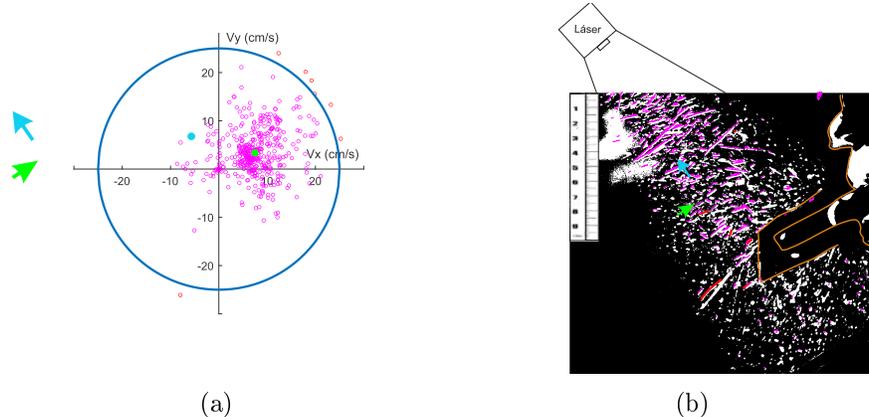


Figura 4.19: Gráficas obtenidas para la flauta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.7. Pie de flauta

También se realizó una prueba al pie de la flauta en donde hay otro orificio por donde las gotas de saliva pueden ser expulsadas.

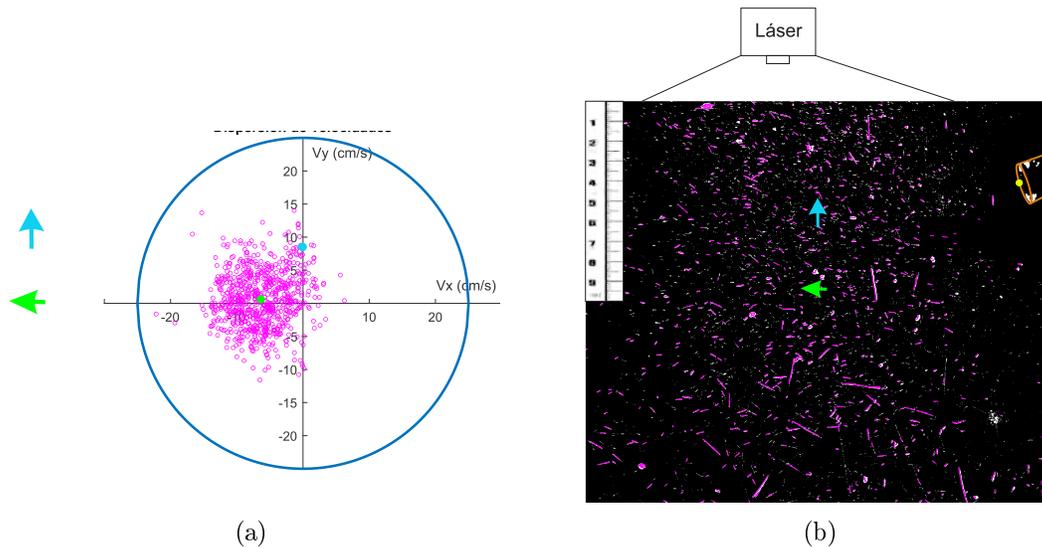


Figura 4.20: Gráficas obtenidas para el pie de la flauta mientras tocaba un fragmento de *Carmina Burana*, de *Orff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

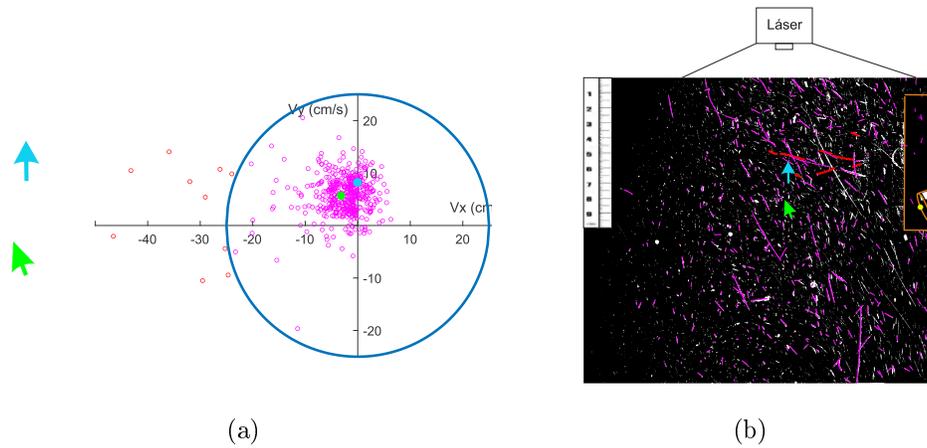


Figura 4.21: Gráficas obtenidas para el pie de la flauta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

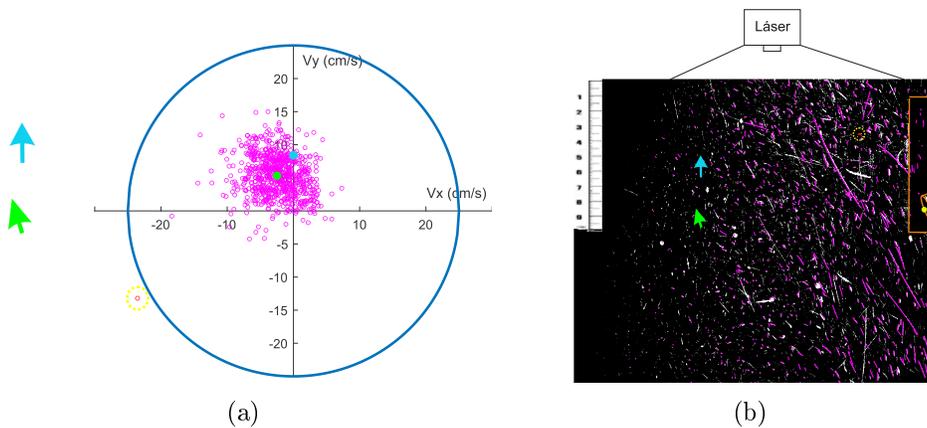


Figura 4.22: Gráficas obtenidas para el pie de la flauta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.8. Oboe

El esquema de este instrumento lo podemos ver en la Figura 3.5 (b), este consta de un resonador recto al igual que el clarinete.

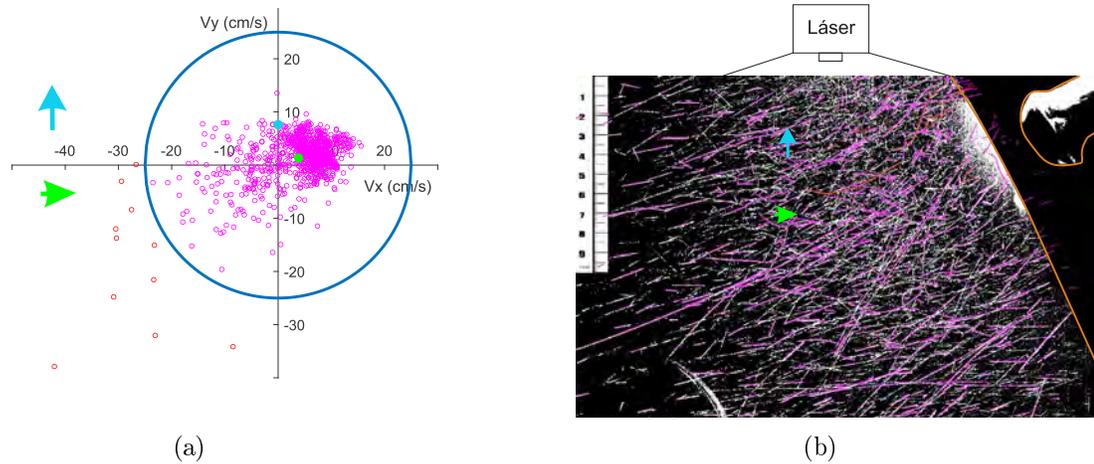


Figura 4.23: Gráficas obtenidas para el oboe mientras tocaba fragmentos de *Carmen* de Bizet y *Serenata en Mi bemol* de Mozart. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

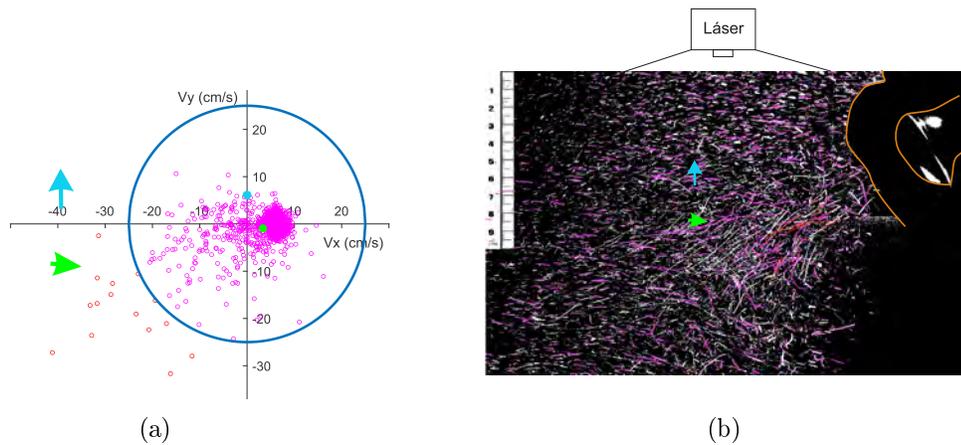


Figura 4.24: Gráficas obtenidas para el oboe mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

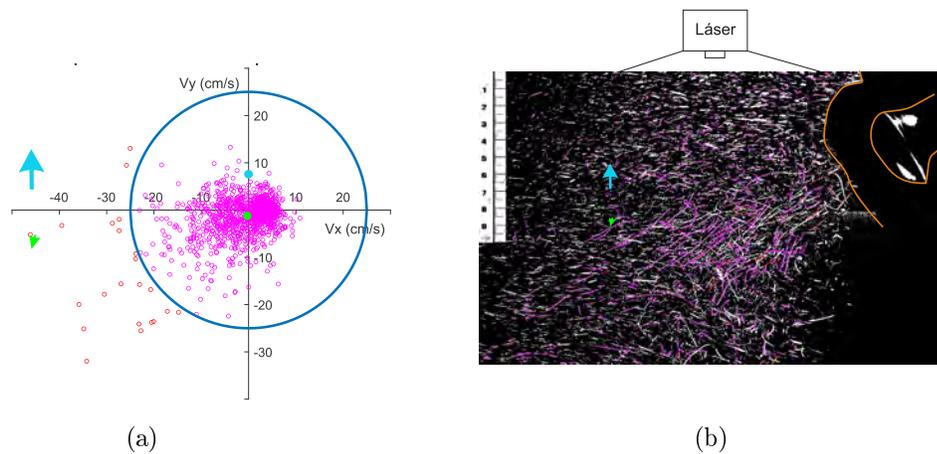


Figura 4.25: Gráficas obtenidas para el oboe mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.9. *Piccolo* (flautín)

Al igual que la flauta se grabó la expulsión de gotas en el bisel del *piccolo*.

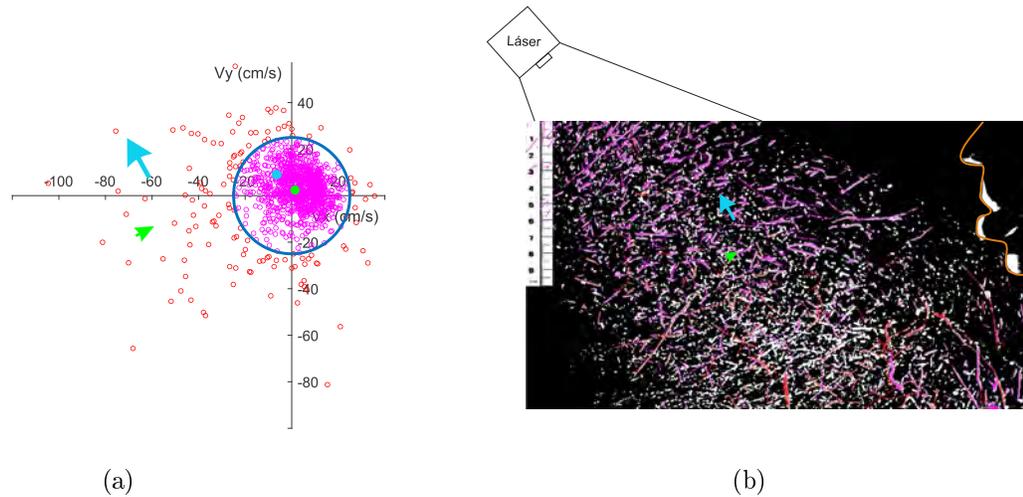


Figura 4.26: Gráficas obtenidas para el *Piccolo* mientras tocaba un fragmento de *Carmina burana* de *Orff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

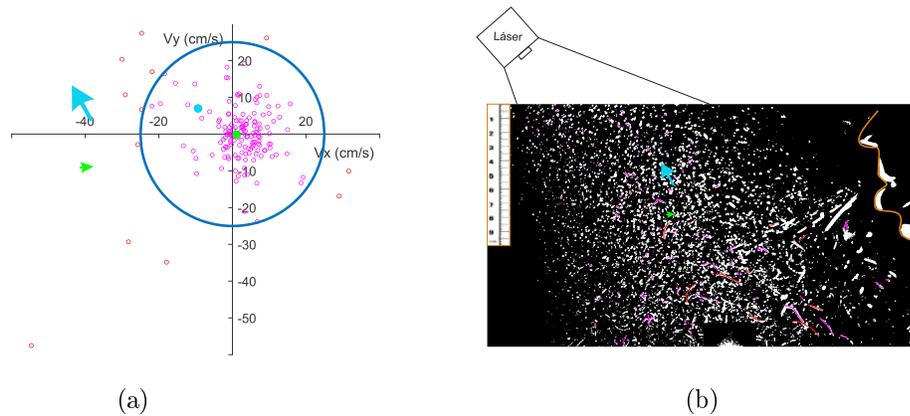


Figura 4.27: Gráficas obtenidas para el *Piccolo* mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

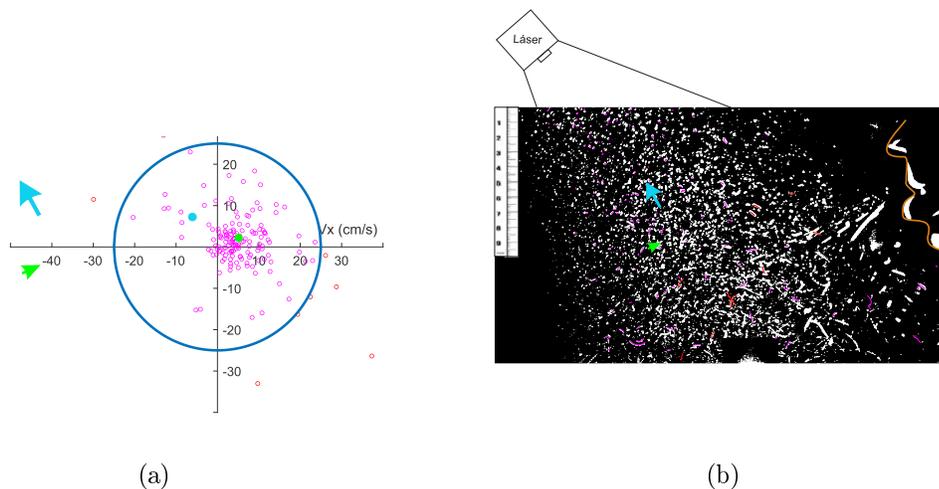


Figura 4.28: Gráficas obtenidas para el *Piccolo* mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.10. Trombón

El esquema del trombón lo podemos encontrar en la Figura 3.5 (c). El reflejo de la vara es apreciable en los esquemas de MPI.

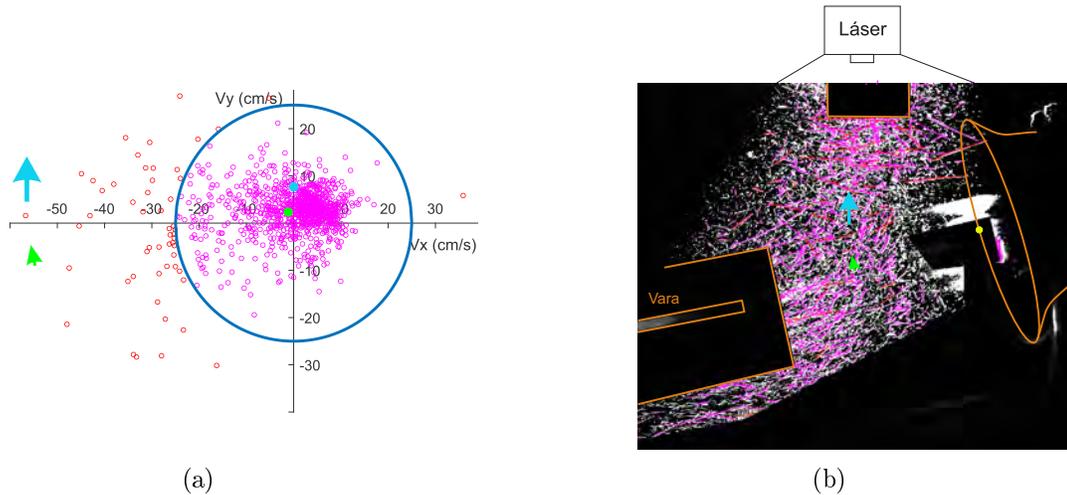


Figura 4.29: Gráficas obtenidas para el trombón mientras tocaba fragmentos de *Tercera Sinfonía* de Mahler y *Preludio al Tercer Acto de Lohengrin* de Wagner. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

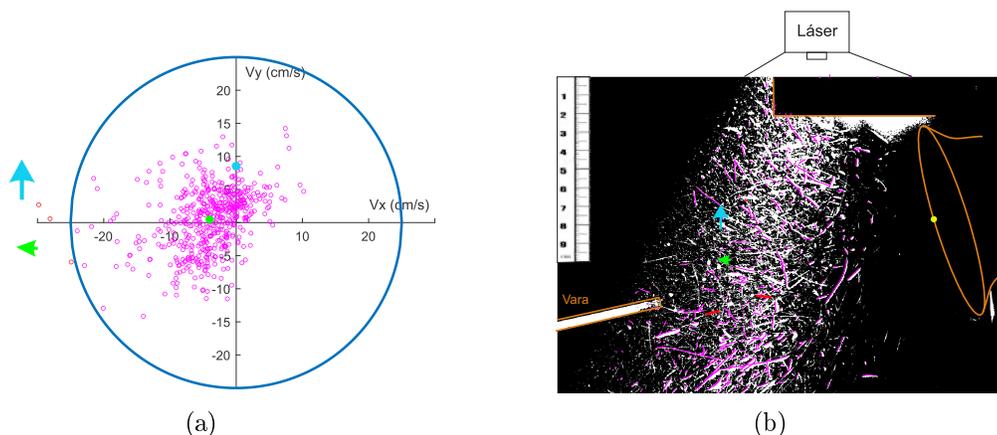


Figura 4.30: Gráficas obtenidas para el trombón mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

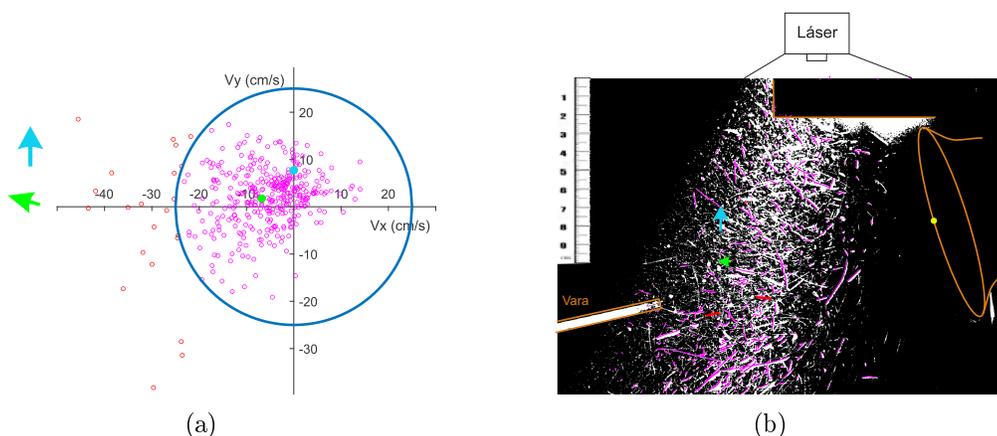


Figura 4.31: Gráficas obtenidas para el trombón mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.11. Trompeta

El esquema de este instrumento se muestra en la Figura 3.5 (d).

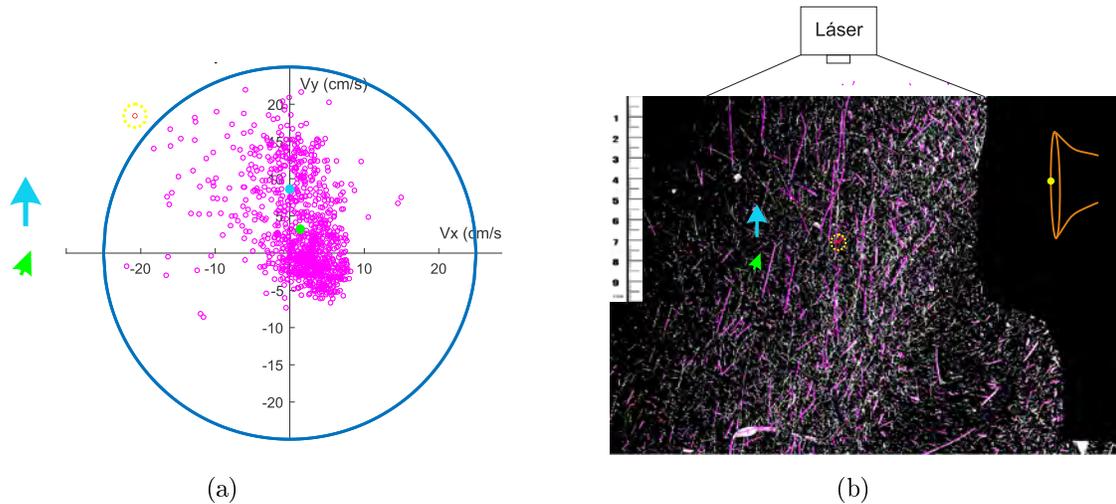


Figura 4.32: Gráficas obtenidas para el trompeta mientras tocaba fragmentos de *Cuadros de una Exposición* de *Mussorgsky* y *Los Pinos de Roma* de *Respighi*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias sobrepuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

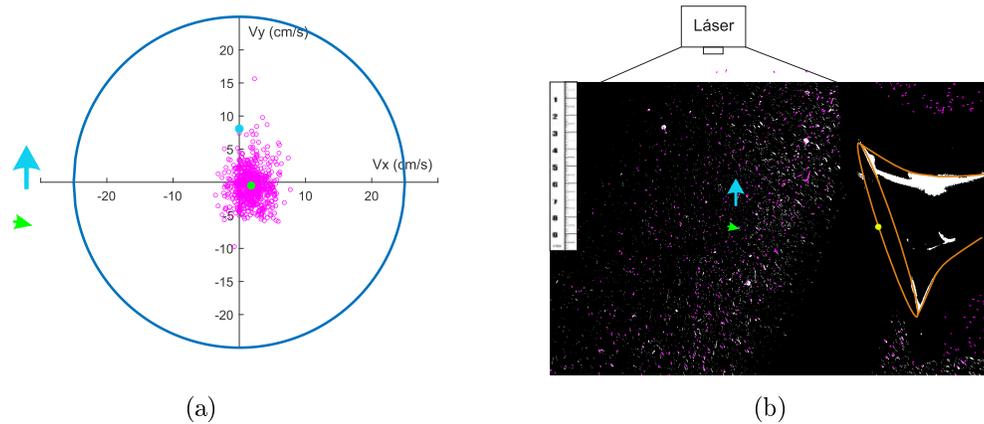


Figura 4.33: Gráficas obtenidas para el trompeta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *mf*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

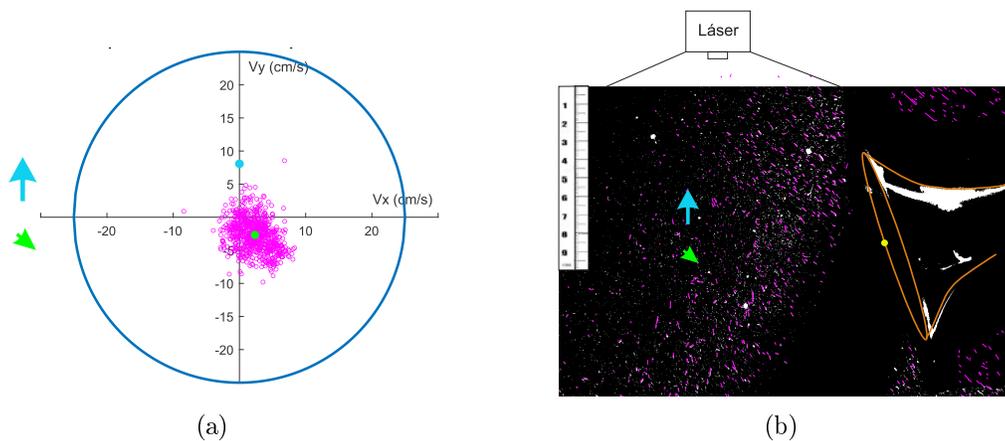


Figura 4.34: Gráficas obtenidas para el trompeta mientras tocaba una escala en ambas direcciones en *ff*. (a) Dispersión de velocidades promedio. (b) MPI con trayectorias superpuestas. En ambas figuras la flecha verde y la flecha azul representan el flujo que lleva el centroide de la dispersión de velocidades promedio, así como el flujo que induciría el láser respectivamente. En (a) se muestra con los mismos colores los puntos correspondientes a ambos flujos en la dispersión de velocidades. En (b) se muestra con un punto amarillo la posición de referencia del pabellón. Las trayectorias y puntos en color rosa representan el polvo, en color rojo las gotas de saliva.

4.12. Resultados generales

En esta sección se presentan parámetros calculados para todos los instrumentos. Por ejemplo en la Tabla 4.1 podemos ver el número de gotas rastreadas por instrumento en cada ejercicio con los filtros descritos en en Apéndice C. Podemos notar que los instrumentos en los que no se observó producción de gotas de saliva fueron el clarinete bajo, el corno francés y la trompeta

Instrumento	Melodía	<i>mf</i>	<i>ff</i>
Clarinete	25	12	0
Clarinete Bajo	0	0	0
Corno francés	1	0	0
Fagot	41	0	1
Agujeros del fagot	11	31	17
Flauta	15	8	7
Pie de flauta	0	10	1
Oboe	11	15	22
Piccolo	128	12	13
Trombón	54	3	22
Trompeta	0	0	0

Tabla 4.1: Número de gotas expulsadas por instrumento en cada ejercicio.

Otro resultado interesante es el diámetro de las gotas de saliva que podemos ver gráficamente en la Figuras 4.35 y 4.36 donde se observa que el instrumento con más gotas producidas es el *piccolo* cuando interpreta la melodía, seguido del trombón en el mismo ejercicio. En general el tamaño de las gotas esta entre $60 - 3300\mu m$.

Después de haber discriminado las gotas de saliva del polvo se puede calcular el alcance con la Expresión (2.5). En la Figuras 4.37 y 4.38 se muestran los alcances para cada gota rastreada por instrumento modelada con tiro parabólico. El alcance no sobrepasa los $40cm$ en ningún caso. De hecho en la Figura 4.39 podemos observar el promedio del alcance de cada instrumento sobre las gotas rastreadas. También se incluye el número de gotas rastreadas en las Figuras 4.40 y 4.41.

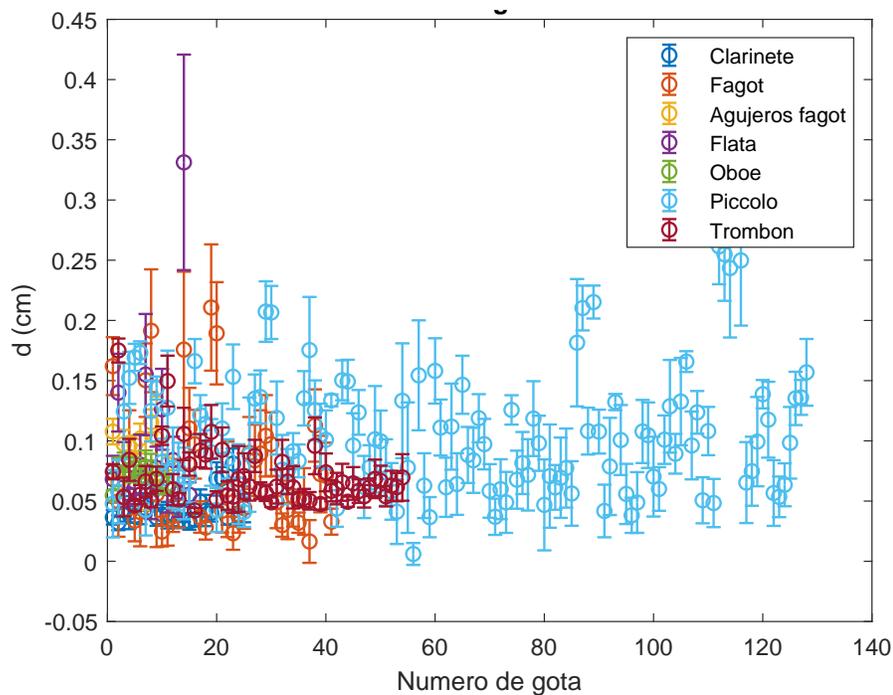


Figura 4.35: Diámetros de las partículas rastreadas para el ejercicio ejecutando un fragmento de melodía calculado con el algoritmo descrito en la sección [C.6](#), el eje y representa el diámetro de cada partícula y el eje x la numero de la gota rastreada.

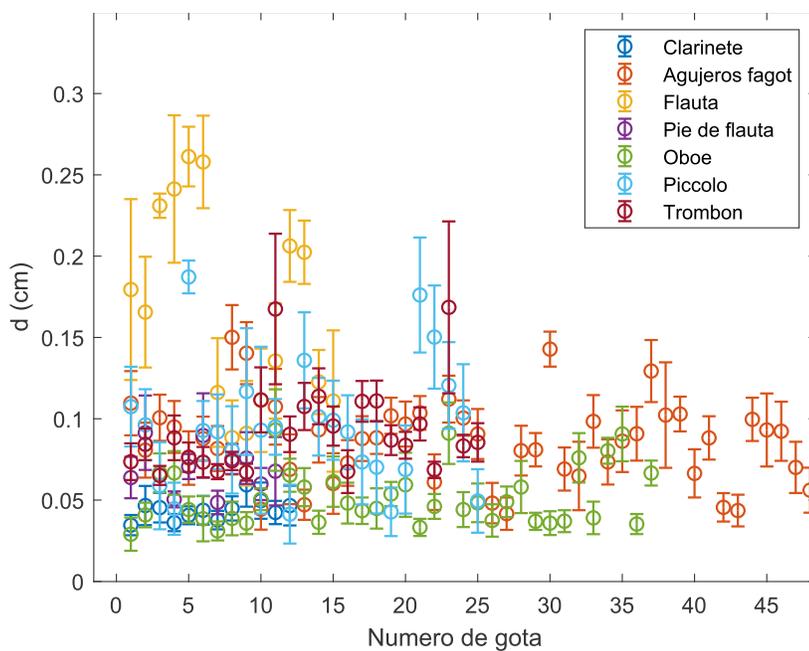


Figura 4.36: Diámetros de las partículas rastreadas para el ejercicio ejecutando escalas calculado con el algoritmo descrito en la sección [C.6](#), el eje y representa el diámetro de cada partícula y el eje x la numero de la gota rastreada.

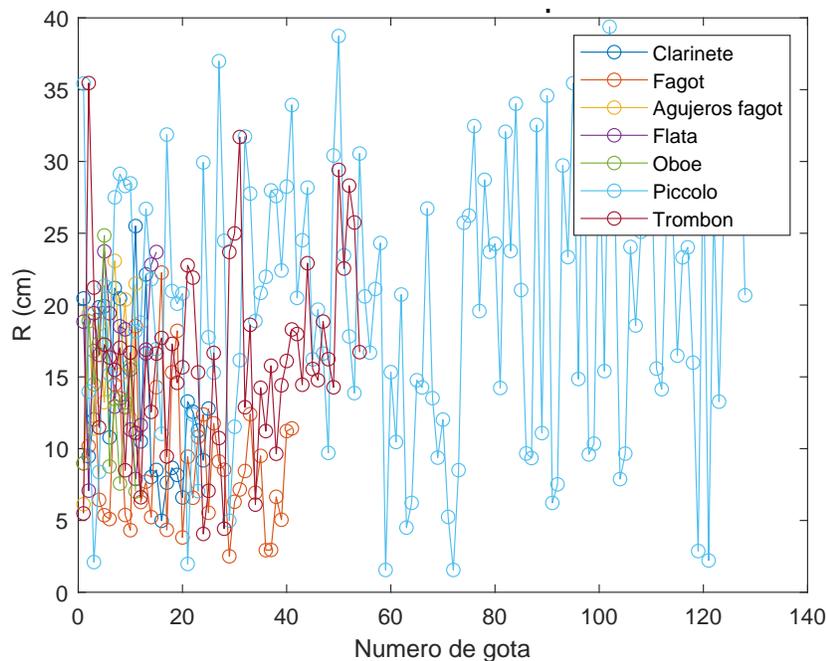


Figura 4.37: Alcances para las gotas de saliva rastreadas para el ejercicio ejecutando un fragmento de melodía utilizando un modelo simple de tiro parabólico.

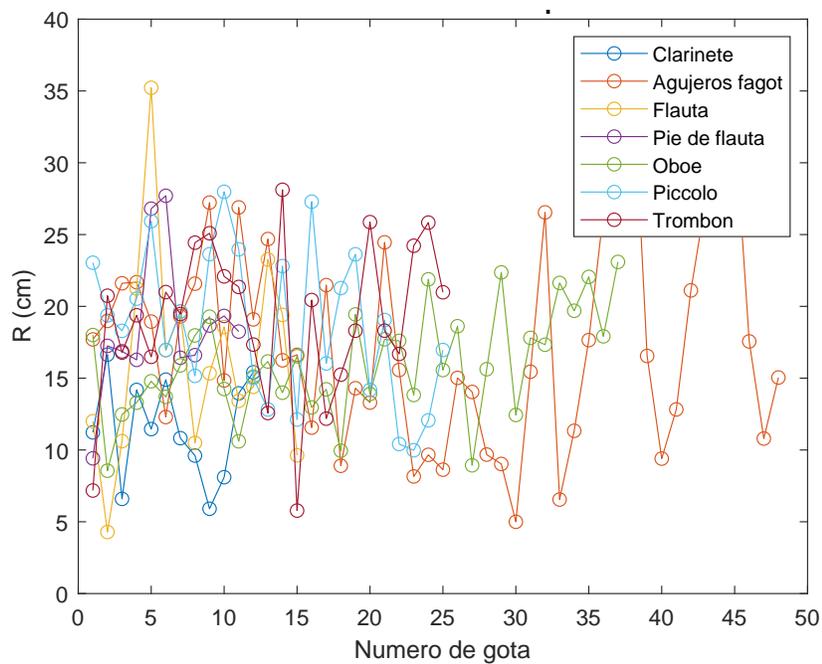


Figura 4.38: Alcances para las gotas de saliva rastreadas para el ejercicio ejecutando escalas utilizando un modelo simple de tiro parabólico.

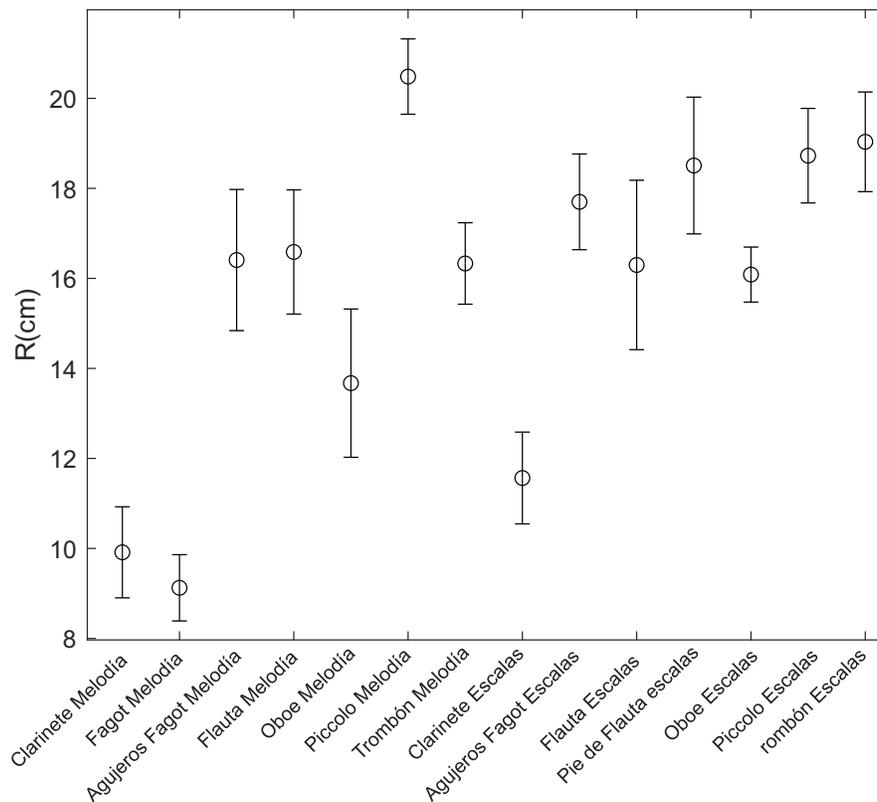


Figura 4.39: Alcances promedio con error estandar por instrumento con el modelo de tiro parabólico.

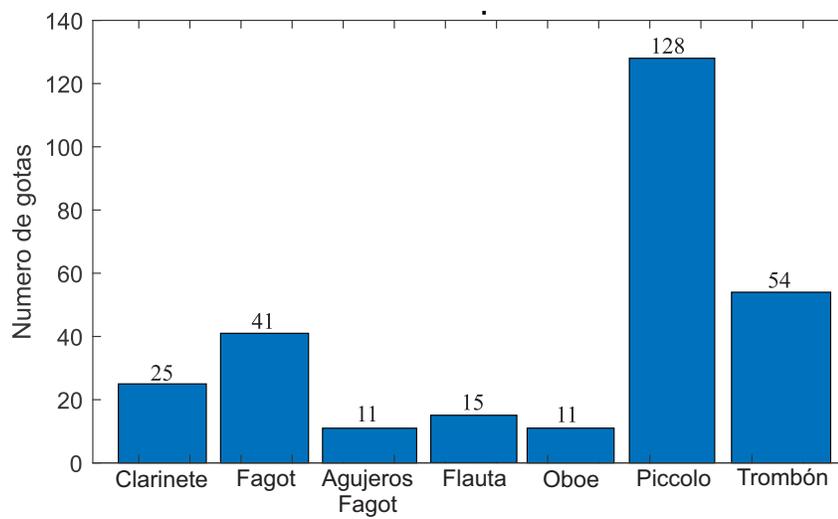


Figura 4.40: Numero de gotas rastreadas por instrumento para el ejercicio ejecutando un fragmento de melodía.

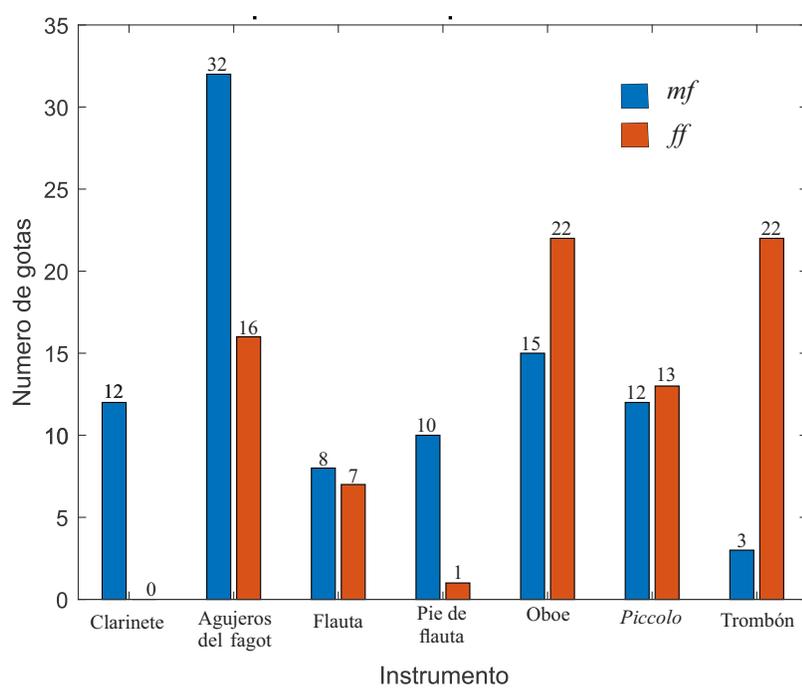


Figura 4.41: Numero de gotas rastreadas por instrumento para el ejercicio ejecutando escalas.

5 Discusión

5.1. Clarinete

Este instrumento muestra expulsión de gotas en ambos ejercicios como se puede ver en las Figuras 4.2 (a) y 4.3 (a). En las Figuras 4.40 y 4.41 observamos que la cantidad de gotas expulsadas es poco más de el doble al interpretar la melodía. Considerando que el tiempo de ejecución de la melodía era el doble que al tocar escalas en *mf*, la tasa de producción de gotas coincide. La Figura 4.4 (a) muestra que no se expulsan gotas al interpretar escalas en *ff*. En la Figura 4.2 se observa una velocidad del centroide del polvo de magnitud muy pequeña, la diferencia entre esta velocidad y la que genera la diferencia de temperaturas en la hoja láser muestra que el instrumento induce la corriente ligeramente inclinada hacia la derecha. Por otro lado en las Figuras 4.3 y 4.4 esta velocidad está dirigida mayormente hacia arriba teniendo una magnitud mayor al interpretar las escalas en *ff* e inclinada hacia la derecha. En los tres casos el instrumento genera una corriente que desvía a la corriente inducida por el láser. Por último se puede observar también que la velocidad promedio de algunas gotas expulsadas mientras se interpretaba la melodía son mayores que al tocar escalas en *mf*.

5.2. Clarinete bajo

Este instrumento es uno que no presenta expulsión de gotas en ningún ejercicio y la razón por la que esto ocurre podría ser la posición de la curva en el resonador que está al final del instrumento justo antes del pabellón como puede verse en la Figura 3.4 (b). En las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se observa pocas partículas de polvo comparadas con el clarinete en la sección anterior. Recordando que estamos restringidos a visualizar las partículas en un plano, la razón de que esto pase es que seguramente alguna corriente secundaria debida ya sea al propio instrumento o a las condiciones del lugar desvíe gran cantidad de polvo en dirección perpendicular de la hoja. Otro hecho interesante es que en la Figura 4.5 (a) se observa que la velocidad promedio del centroide del polvo está dirigida hacia el pabellón, esto es distinto en las Figuras 4.6 y 4.7 en donde la velocidad está dirigida hacia arriba en el caso de *mf* y con menor magnitud y ligeramente inclinada a la izquierda en el caso de *ff*, esto podría indicar un flujo a mayor nivel dinámico. En los tres casos el instrumento cambia la corriente esperada por la diferencia de temperatura en la hoja láser.

5.3. Corno francés

Este instrumento muestra una partícula que pasa los 25cm/s como se ve en la Figura 4.8, sin embargo el hecho de que este tan cerca de esta velocidad y solamente haya una partícula no parece demostrar que se trate de una gota. El que no haya partículas candidatas a ser gotas de saliva puede deberse a la gran cantidad de curvas en el resonador instrumento o a que no haya una parte recta suficientemente larga en el resonador antes del pabellón. Al igual que el clarinete bajo al ver las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 no hay muchas partículas de polvo rastreadas comparadas con el clarinete por ejemplo. Alguna corriente secundaria debida al instrumento o a las conducciones del lugar debe estar desviando gran cantidad del polvo en dirección perpendicular a la hoja láser. En las Figuras 4.8 (a), 4.9 (a) y 4.10 (a) notamos que la velocidad promedio del centroide del polvo esta dirigida hacia el pabellón y difiere completamente de la que se espera por la posición del láser. Cabe mencionar que la forma de ejecutar este instrumento requiere que una mano del intérprete este dentro del pabellón por lo que las gotas expelidas quedarian atrapadas en ella.

5.4. Fagot

Este instrumento solamente expulsó gotas de saliva mientras se interpretaba la melodía como se muestra en la Figura 4.11, aquí hay algunas trayectorias de gotas de saliva que se curvan hacia la derecha, en este caso seguramente se desvían hacia ese lado porque siguen ligeramente algún flujo secundario. La Figura 4.13 muestra solamente una partícula que tiene una velocidad promedio mayor a 25cm/s , sin embargo debido a que solamente se rastreo una y su velocidad no es mucho mayor a la velocidad umbral no podemos asegurar que se trate de una gota de saliva. En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 notamos que la velocidad promedio del centroide del polvo no difiere mucho de la que se espera por la posición del láser por lo que probablemente la corriente inducida por el instrumento es muy pequeña.

5.5. Agujeros del fagot

Esta sección fue incluida debido a que el intérprete de este instrumento comentó que en la yema del dedo sentía rozar algunas gotas de saliva. Las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestran que en efecto por los orificios que cubren la mano izquierda (ver Figura 3.4 (d)) se producen gotas de saliva. En este caso la tasa de expulsión de gotas es mayor al interpretar escalas en diferentes niveles dinámicos que al interpretar la melodía como se muestra en las figuras 4.40 y 4.41, también se muestra que la tasa de expulsión en *mf* es el doble que en *ff*. Respecto a la dirección de la velocidad promedio del centroide del polvo, esta no difiere demasiado a la esperada por la posición del láser, la corriente que induce en los orificios del fagot seguramente es muy pequeña pues no siempre se mantienen abiertos.

5.6. Flauta

Para este instrumento hay partículas que rebasan la velocidad umbral en ambos ejercicios. En la figura [4.17](#) observamos que la velocidad promedio de cada gota esta dirigida en varias direcciones diferentes, y aunque seguramente el aire al chocar contra el bisel podría provocar que la corriente vaya hacia la derecha, el área de interés no cubre a las gotas que podrían ir en esa dirección por lo que las partículas rebasa a la velocidad umbral hacia la derecha son poco fiables. En las figuraas [4.18](#) y [4.19](#) podemos notar que casi todas las partículas que rebasan la velocidad umbral van hacia la derecha, por la razón anterior estas gotas tampoco tienen mucha credibilidad. En ambos ejercicios se observa que la velocidad promedio del centroide del polvo esta dirigida hacia la derecha a pesar de la posición del láser a la izquierda, por lo que el instrumento induce una corriente que difiere bastante a la esperada debido a la diferencia de temperaturas en la hoja láser.

5.7. Pie de flauta

En este caso como se ve en la Figura [4.20](#) no hay partículas que rebasan la velocidad umbral durante la interpretación de la melodía, por otro lado en la Figura [4.21](#) (a) se observan varias gotas de saliva que la rebasan en *mf* a diferencia de la Figura [4.22](#) (a) donde solamente se observa una partícula, este caso esta tan alejado de la distribución de polvo que podemos considerarlo una gota de saliva. En la figura [4.41](#) se puede observar que la tasa de expulsión de gotas es diez veces mayor en *mf* que en *ff*. Por ultimo, en la Figura [4.20](#) (a) se observa que la dirección de la velocidad promedio del centroide del polvo esta inclinada completamente hacia la izquierda mientras que en las Figuras [4.21](#) y [4.22](#) va hacia arriba inclinada ligeramente a la izquierda y no difiere mucho a la esperada por la posición del láser. Lo que podría explicar este comportamiento es que en la melodía las notas ejecutadas seguramente tapaban la mayoría de los agujeros en el resonador a diferencia al ejecutar escalas.

5.8. Oboe

Este instrumento muestra una clara expulsión de partículas de saliva en ambos ejercicios tal como se muestra en las Figuras [4.23](#), [4.24](#) y [4.25](#). Lo que sucede es que al igual que el clarinete, el resonador es completamente recto y el flujo de aire de la boquilla va en la misma dirección que el eje del resonador (en la flauta por ejemplo el flujo en el bisel va en dirección perpendicular al eje del resonador) por lo que las partículas de saliva no tienen muchos obstaculos en donde puedan quedar atrapadas. En las Figuras [4.40](#) y [4.41](#) podemos observar que la tasa de expulsión es mayor en los ejercicios ejecutando escalas que al ejecutar la melodía, además *ff* presenta mayor expulsión que *mf*. Respecto a la dirección de la velocidad promedio del centroide del polvo, al interpretar la melodía y en *mf* se muestra inclinada ligeramente a la derecha dirigida hacia el pabellón, mientras que en *ff* casi se anula. En todos los casos difieren de la velocidad esperada por la posición del láser por lo que el instrumento seguramente induce una corriente.

5.9. *Piccolo* (flautín)

En la figura [4.26](#) se observa una grán cantidad de partículas detectadas para este instrumento, sin embargo al igual que para la flauta aquellas cuya velocidad promedio este dirigida hacia la derecha no tienen mucha veracidad ya que aunque el choque del aire con el bisel podría dirigir a algunas gotas en esta dirección, la hoja láser no cubre el área donde podrían encontrarse. En las figuras [4.27](#) y [4.28](#) se ve claramente que la producción de gotas al ejecutar las escalas es mucho menor que al ejecutar la melodía, se desconoce el motivo por el cuál ocurra esto, pero hacer pruebas interpretando temas distintos podría ayudarnos investigar por que ocurre. Respecto a la dirección de la velocidad promedio del centroide del polvo, al interpretar la melodía y en *mf* casi se anula ligeramente inclinada a la derecha, mientras que en *ff* la magnitud de esta es mayor conservando la inclinación, en todos los casos difiere de la velocidad esperada por la posición del láser.

5.10. Trombón

Este instrumento al igual que el corno francés y la trompeta tiene bastantes curvas en el resonador, sin embargo expulsa una gran cantidad de gotas al interpretar la melodía comparandolas con el ejercicio al interpretar escalas como se muestra en las figuras [4.29](#), [4.30](#) y [4.31](#). Cabe mencionar tambien que la parte del resonador que esta detras del trombón es mayor comparado con la parte del resonador que esta detras del pabellón del corno francés y el clarinete bajo, por lo que seguramente esta sea la razón de el trombón expulse gotas y los demás instrumentos mencionados no lo hagan. Las Figuras [4.40](#) y [4.41](#) muestran que la expulsión de gotas al interpretar la melodía es casi el doble que al interpretar escalas a diferentes niveles dinámicos. Por otro lado se produce una cantidad considerablemente mayor en *ff* que en *mf*. Respecto a la velocidad promedio del centroide del polvo se observa que en el momento de ejecutar la melodía esta casi se anula, mientras que al tocar escalas se inclina hacia la izquierda, de este modo el flujo que induce el instrumento va en dirección opuesta al pabellón solo al interpretar escalas.

5.11. Trompeta

En la Figura [4.32](#) podemos observar una partícula que tiene una velocidad mayor a 25cm/s sin embargo la diferencia es muy poca y además tiene partículas de polvo con velocidades cercanas en la misma dirección, así que esta partícula no es buena candidata para considerarse como gota de saliva. En las Figuras [4.33](#) y [4.34](#) no se observan partículas que rebasen nuestra velocidad umbral por lo que este instrumento no tiene registro de gotas expulsadas. Respecto a la velocidad promedio del centroide del polvo, mientras se interpretaba la melodía tiene dirección hacia arriba a la derecha, mientras que en *mf* va hacia la derecha con menor magnitud y en *ff* esta dirigida hacia abajo a la derecha, en todo los casos difiere bastante de la corriente esperada por la posición del láser.

6 Conclusiones

Los instrumentos con resonadores completamente rectos, en este caso el clarinete y el oboe, muestran expulsión de gotas de saliva en ambos ejercicios. Sin embargo la expulsión de gotas no parece estar relacionada con el nivel dinámico ya que en el caso del clarinete, agujeros del fagot, y pie de flauta se produjeron más gotas durante el ejercicio en *mf* mientras que para el oboe y el trombón se produjeron más en *ff*, incluso para el *piccolo* y la flauta la cantidad es muy similar. Hacer una estadística más amplia con diferentes intérpretes del mismo instrumento y con más de un rastreo por intérprete sería necesario para poder afirmar esto de manera contundente.

Los instrumentos que no mostraron expulsión de gotas son el clarinete bajo, el corno francés y la trompeta. Lo que se sospecha en el caso del clarinete bajo y el corno francés es que la falta de una parte recta anterior pabellón en el resonador influya en que las gotas se queden atrapadas, esta hipótesis debería poder ser probada o refutada al observar el comportamiento de la saliva dentro del instrumento. El motivo por el que la trompeta no muestre expulsión de gotas no tiene una razón aparente.

El clarinete bajo muestra un comportamiento interesante pues mientras tocaba la melodía se observa una corriente del polvo dirigida hacia el pabellón del instrumento con una magnitud pequeña. Mientras que al tocar las escalas en diferentes niveles dinámicos la corriente se dirige en la misma dirección en la que apunta el pabellón en donde el nivel dinámico afecta notablemente en la magnitud de la velocidad promedio de las partículas. En el caso del corno francés y la trompeta ocurre algo similar al caso del clarinete bajo durante la melodía, ya que la corriente del polvo está dirigida hacia el pabellón con una magnitud pequeña. Sin embargo en estos casos no se muestra una corriente que apunta en la misma dirección que el pabellón.

La flauta y el *piccolo* son dos instrumentos con un bisel, una característica que los hace similares. Sin embargo la expulsión de gotas en el caso de la flauta fue mucho menor que en el caso del *piccolo* al interpretar la melodía. Habría que reliazar un estudio más detallado del flujo cerca del bisel para explicar por que ocurre esto. Por otro lado la expulsión de gotas al interpretar escalas aunque no coincide en la cantidad de gotas rastreadas coincide en el sentido en que la cantidad en *mf* y *ff* es difiere por muy poco en ambos casos. De nuevo el estudiar el flujo cerca del bisel podría ayudarnos explicar esta coincidencia.

El trombón a pesar de tener un resonador con bastantes curvas presenta una expulsión

de gotas en ambos ejercicios debido probablemente a que el final de este tiene forma recta y una longitud mayor que la del clarinete bajo y el corno francés, por ejemplo. En este caso la expulsión de gotas es mayor al tocar en *ff* que al tocar en *mf* observando una corriente dirigida en la misma dirección en la que apunta el pabellón del instrumento.

Esta técnica como se menciona en la sección anterior tiene varias limitaciones. La primera es que estamos restringidos al movimiento en un plano. El diseñar un arreglo en el que se pueda grabar en un volumen con varias cámaras y un volumen láser podría darnos datos para hacer una estadística más confiable y eliminaría el problema de que las partículas vayan mayormente en dirección perpendicular al plano. El segundo esta en la manera discriminar al polvo, puesto que en muchas ocasiones la velocidad umbral no resalta de forma correcta la diferencia entre el polvo y las gotas de saliva debido a las corrientes secundarias.

De forma general conciderando las limitaciones mencionadas anteriormente y el modelo simple de tiro parabólico que no considera la disipación de energía por resistencia del aire se concluye que el alcance en todos los instrumentos analizados no rebasa los 40cm que es casi un cuarto de la distancia que reportan Brosseau *et al.* [10] para la dispersión de aerosoles. Si se considerara el arrastre (ignorando las corrientes secundarias de nuevo) este valor disminuiría. Por otro lado no se encontró que a mayor nivel dinámico hubiera una expulsión mayor de gotas en general.

A Función *magicwandbw*

```
function bin_mask = magicwandbw(im, ylist, xlist, tolerance)
% MAGICWAND simulates the Photoshop's magic wand tool
% It allows selection of connected pixels whose colors are
% within a defined tolerance of reference pixels.
%
% SYNTAX
%   bin_mask = magicwand(im, ylist, xlist, tolerance);
%
% INPUT
%   im:      input image RGB
%   ylist:   vector of row coordinates   (reference pixels)
%   xlist:   vector of column coordinates (reference pixels)
%   tolerance: distance to reference pixels
%
% OUTPUT
%   bin_mask: binary mask of selected regions
%
% EXAMPLE
%   The following code selects the girl's face:
%   im = imread('test.jpg');
%   bin_mask = magicwand(im, [199 217], [318 371], 50);
%   subplot(1, 2, 1); imshow(im);
%   subplot(1, 2, 2); imshow(bin_mask);
%
% NOTES
%   * Tested with MATLAB R13 & Image Processing Toolbox
%   * C++ version by Daniel Lau and Yoram Tal are also
%     available in MATLAB Central
%
% (C) 2004 Son Lam Phung
% Email: s.phung@ecu.edu.au
% Edith Cowan University
H = size(im, 1); % image height
W = size(im, 2); % image width
% Check arguments
```

```

if any(ylist > H)
    s = sprintf('Row coordinates greater than the image height
                (%g).', H);
    error(s);
end
if any(xlist > W)
    s = sprintf('Column coordinates greater than the image
                height (%g).', W);
    error(s);
end
c_r = double(im(:, :)); % Red channel
c_g = double(im(:, :)); % Green channel
c_b = double(im(:, :)); % Blue channel
N = length(ylist); % Number of reference pixels
% Find all pixels whose colors fall within the specified
    tolerance
color_mask = false(H, W);
for idx = 1:length(ylist)
    ref_r = double(im(ylist(idx), xlist(idx)));
    ref_g = double(im(ylist(idx), xlist(idx)));
    ref_b = double(im(ylist(idx), xlist(idx)));
    color_mask = color_mask | ...
                ((c_r - ref_r) .^ 2 + (c_g - ref_g) .^ 2 + ...
                 (c_b - ref_b) .^ 2) <= tolerance ^ 2;
end
% Connected component labelling
[objects, count] = bwlabel(color_mask, 8);
% Initialize output mask
bin_mask = false(H, W);
% Linear indices of reference pixels
pos_idx = (xlist - 1) * H + ylist;
for idx = 1:count
    object = (objects == idx); % an object

    % Add to output mask if the object contains a reference
        pixel
    if any(object(pos_idx))
        bin_mask = bin_mask | object;
    end
end
end

```

B Función *Rtp*

```
function R = Rtp(V, t, h)
    g=9.81;
    tr=(pi/180)*t;
    z=(g*h)/(power(V,2));
    a=sin(tr)+sqrt(power(sin(tr),2)+2*z);
    b=power(V,2)*a*cos(tr);
    R=b/g;
end
```


C *Procesamiento de datos*

Los datos exportados de los algoritmos de PTV fueron procesados en *Matlab R2022b* para extraer información adicional. Se desarrollaron filtros para discriminar el polvo de las partículas de saliva y también aquellas partículas que se rastreaban solo en pocos cuadros. La forma en que se calcularon y guardaron parámetros importantes (velocidades instantáneas, componentes promedio y desviación estándar de velocidad, ángulos de inclinación y radio de la partícula) es la misma para todos los videos. Sin embargo primero se realizó para el video donde solamente se grabó fondo para encontrar una velocidad que caracterizara al polvo y posteriormente para los demás. Algunas diferencias se mencionarán más adelante sobre como se obtuvieron ciertos parámetros en los tres tipos diferentes de videos que para fines prácticos se indexan en la Tabla [C.2](#). Para cada caso la forma de leerlos y la información requerida para la interpretación de resultados cambia ligeramente.

Indice	Video
1	Caracterización del polvo
2	Escalas en diferentes niveles dinámicos
3	Melodía del repertorio orquestal

Tabla C.1: Indices para diferentes casos de videos procesados.

C.1. **Parámetros importantes durante todo el algoritmo, y primer filtro para discriminar partículas rastreadas**

El *plugin* exporta la información del rastreo en escalas no físicas, ya que el tiempo está en cuadros y la escala espacial en píxeles, para tener nuestros resultados en una escala temporal basta con conocer la tasa de adquisición en fotogramas por segundo (que fue la misma para todos los experimentos). De este modo cada paso en segundos en el tiempo es igual al inverso de este valor. Por otro lado para la parte espacial hay que tener la referencia de alguna dimensión física y es por eso que antes de grabar cada video se tomó la fotografía de una regla para calcular la equivalencia de centímetros a píxeles, ya que el área de interés para cada instrumento es diferente. Durante todo el procesamiento de datos nos referiremos a los diferentes tipos de videos de la forma en que se menciona en la Tabla [C.1](#). En el Caso **1** la escala espacial corresponde a un solo valor, sin embargo en los casos **2** y **3** tenemos

Instrumento	i
Clarinete	1
Clarinete bajo	2
Corno francés	3
Fagot	4
Agujero del fagot	5
Flauta	6
Pie de la flauta	7
Oboe	8
<i>Piccolo</i>	9
Trombón	10
Trompeta	11

Tabla C.2: Índices de los instrumentos musicales analizados. La entrada del arreglo $factors[i,j+4]$ se refiere a los píxeles equivalentes a un centímetro del instrumento i , realizando el ejercicio j .

diferentes valores para cada instrumento, estos valores los encontramos en el arreglo $factors$. Los archivos que tienen toda la información del rastreo tienen la siguiente estructura: $allframesd=6_i_j.csv$ donde el índice i se refiere al instrumento (ver Tabla C.2) y j al tipo de interpretación con $j = 1$ para la melodía y $j = 2$ para las escalas a diferentes niveles dinámicos. El arreglo $factors$ mencionado anteriormente se indexó de la misma forma, utilizando la variable $count1$ para el índice i y $count2$ para el índice j .

Este programa también exporta 2 arreglos con resultados importantes. El primero de ellos guardado como $datai_j.csv$ en el que hay un solo valor para cada partícula. Es decir en un renglón se guarda la información de una sola partícula rastreada después de haber discriminado a aquellas que se consideran polvo. En la tabla C.4 se muestra que hay en cada columna de dicho arreglo. El segundo archivo nombrado $droplettrackingi_j.csv$ guarda el rastreo de las partículas después de haberlas filtrado, los valores de cada columna los podemos ver en la Tabla C.3.

Parámetro	Columna
Número de la partícula	1
Coordenada $x(cm)$	2
Coordenada $y(cm)$	3
Coordenada $t(s)$	4
Coordenada $x(pxels)$	5
Coordenada $y(pxels)$	6
Coordenada $t(cuadros)$	7

Tabla C.3: Título de cada columna guardado en el archivo $droplettrackingi_j.csv$.

C.1. PARÁMETROS IMPORTANTES DURANTE TODO EL ALGORITMO, Y PRIMER FILTRO PARA

Parámetro	Columna
Número de la partícula	1
Diámetro	2
Desviación estandar del Diámetro	3
Promedio de V_x	4
Desviación estándar de V_x	5
Promedio de V_y	6
Desviación estándar de V_y	7
Magnitud del promedio de \vec{V}	8
Ángulo inicial en grados	9
Ángulo máximo en grados	10
Ángulo mínimo en grados	11
Número de cuadros en que aparece	12
Cuadro inicial	13
Cuadro final	14
coordenada x inicial	15
coordenada y inicial	16
V_x inicial	17
V_y inicial	18
Alcance con modelo de tiro parabólico	19
Alcance con modelo de Tartaglia	20

Tabla C.4: Título de cada columna guardado en el archivo *datai_j.csv*. El número de la partícula se refiere al número que el *plugin* asigna a cada rastreo. El diámetro de la partícula es el mismo para todas, sin embargo este valor se calculará posteriormente.

```

clc;
clearvars;
factors = xlsread('factors.xlsx'); %The array factors have the
% equivalence between pixels and centimeters of every
    instrument
%% This program give us two important arrays about melody part
    of each instrument,
%% first finalresults saved as datai_j.csv and important
    figures
%% trayectories with and without maximum, scattering of
    velocity components
% i is the index that counts the instrument and j is the index
    that count
% the melody or scales

% It has the next info as columns
% 1 particle number
% 2 diameter

```

```

% 3 standart deviation of diameter
% 4 mean x-velocity
% 5 standart deviation x-velocity
% 6 mean y-velocity
% 7 standart deviation y-velocity
% 8 magnitud mean velocity
% 9 initial angle in degrees
% 10 max angle in degrees
% 11 min angle in degrees
% 12 (only for finalresults) num of frames
% 13 Initial frame
% 14 Final frame
% 15 x initial
% 16 y initial
% 17 vx initial
% 18 vy initial
% 19 Range with parabolic shot
% 20 Range with Tartaglia[U+FFFD] model

%% The second is finaltracking array saved as dropletrackingi_j
   .csv
% The index are similar to the first part

% 1 Particle number
% 2 x physical coordinate
% 3 y physical coordinate
% 4 t physical coordinate
% 5 x non-physical coordinate
% 6 y non-physical coordinate
% 7 t non-physical coordinate

count1=11; %It counts instrument
% 1 Clarinet
% 2 Bass clarinet
% 3 French Horn
% 4 Bassoon
% 5 Holes of bassoon
% 6 Flute
% 7 Flute foot
% 8 Oboe
% 9 Piccolo
% 10 Trombone
% 11 Trumpet

count2=2; % 1 Melody 2 Scales

```

C.1. PARÁMETROS IMPORTANTES DURANTE TODO EL ALGORITMO, Y PRIMER FILTRO PARA

Listing C.1: Declaración de algunos parámetros que se utilizaran a lo largo del código. Orden de las carpetas en las que están organizadas los videos y archivos que exporta el programa.

En el Caso **1** había un solo archivo que contenía la información del rastreo. En los casos **2** y **3** habían distintos archivos. En la sección [C.2](#) del código lo primero que se hace es guardar en una cadena de caracteres el nombre del archivo con la ayuda de las variables *count1* y *count2*, posteriormente se procede a mover toda la información que está en ese archivo en un arreglo llamado *Data*. En primera instancia el objetivo es filtrar los datos de este arreglo para después guardar parámetros importantes individuales en el arreglo *results* (posteriormente exportado como *datai_j.csv*) y guardar sus rastreos en el arreglo *tracking* (posteriormente exportado como *dropletrackingi_j.csv*).

De nuevo en la Sección [C.2](#) se aplica un primer filtro a las partículas que aparezcan menos de 8 veces para ser eliminadas. Para esto se definen primero dos variables, la primera *discriminat* = 8 y la segunda *numpartrack* en la que se guarda el valor máximo de la columna 2 del arreglo *Data*. Este es el número total de partículas rastreadas menos 1, puesto que esta columna contiene el número que el *plugin* asigna a cada rastreo comenzando en 0. Aplicando la función $a=find(Data(:,2)==i-1)$ que devuelve un vector con los índices de los renglones donde el valor de la columna 2 de *Data* es igual a $i-1$ con un ciclo *for* con i desde 1 hasta $numpartrack + 1$ podemos eliminar los rastreos deseados. Si el tamaño de este vector es menor a 8 simplemente omitimos guardar la nueva etiqueta que daremos a la partícula rastreada (*numpart*) en la primera columna de *results* y su radio en la columna 2 (que está en la columna 9 de *Data*) así como el rastreo de cada una (columnas 4, 5 y 6 del arreglo *Data*) en las columnas 2, 3 y 4 de *tracking* con un condicional *if*. Fuera del ciclo *for* se definen dos contadores $numpart = 0$ y $k = 1$. El primer contador se utiliza para enumerar las partículas en el arreglo *results* después de haber aplicado el primer filtro y empieza en cero de acuerdo al formato original en que se exporta el *plugin*. Este contador consiste en la nueva etiqueta que se le da a cada partícula asignada por este programa y es igual al número de partículas restantes menos uno. El contador k sirve para enumerar los datos guardados en *tracking*, puesto que en este arreglo cada partícula tiene al menos 8 renglones con información de su posición en las tres dimensiones (x , y y t).

```
namefolder=strcat('allframesd=6_',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),' .csv');
% First the name of the file .csv is saved in variable
    namefolder to extract
% all important information about the tracking
Data = xlsread(namefolder); %All tracking info is saved in
    variable Data
numpartrack=max(Data(:,2)); %The column 2 has the number of
    particle tracked,
%but it starts in zero, so the maximum of this one plus one is
    the number of
```

```

%particles tracked
sizelist=length(Data); %This is the number of points tracked
numpart=0;% we are going to use a counter to count particles
    that appears
%more than 8 times in the tracking, no less
k=1; %This isn't a counter, is only to enumerate the particles
    that meet
%the above condition
discriminant=8;
for i=1:numpartrack+1
    a=find(Data(:,2)==i-1);% the funtion give us a vector with
        indices
    %that have the number in column two of data equals of the
        right part,
    %remember the Data list starts in zero
    n=length(a);
    if n>=discriminant
        numpart=numpart+1; %numpart is the number of particles
            that counts
        %particles that are not discriminated
        results(numpart,1)=numpart; %results is the array where
            we're going
        % to save with general information i.e. one row by
            particle with
        % general information
        results(numpart,2)=Data(a(1),9); %Ratio of the plugin,
            is not the correct!
        for j=1:n %The array traking have all pionts (spatial
            and time points)
            % of every particle.
            % Again, j count the index in the array a, but k is
                in the
            % general array tracking
            tracking(k,1)=numpart; %particle number
            tracking(k,2)=Data(a(j),4); %x coordinate
            tracking(k,3)=Data(a(j),5); %y coordinate
            tracking(k,4)=Data(a(j),7); % time
            k=k+1;
        end
    end
end
end

```

Listing C.2: Lectura del archivo *.csv* donde se encuentran el rastreo individual de cada partícula y primer filtro considerando que la partícula sea rastreada al menos 8 veces.

C.2. Cálculo de velocidades, ángulos de inclinación y discriminación de polvo por velocidad promedio de las partículas

En los casos **1** y **2** estos cálculos se hacen de la misma manera que en la sección anterior. Sin embargo en el Caso **3** se hace una pequeña modificación: se divide el video en dos por la mitad. La primera mitad corresponde al nivel dinámico *mf* y la segunda corresponde a *ff*. Lo primero que se hace en la Sección [C.3](#) es de nuevo definir dos contadores que nos van a ayudar a guardar información importante en los arreglos *velocidad* y *theta*, donde se guarda la velocidad y el ángulo de inclinación respectivamente. Sin embargo como ya se ha mencionado hay que ser cuidadosos con las unidades. Si hacemos los cálculos con las unidades que tiene el archivo las velocidades tendrán la unidad de

$$[V] = \left[\frac{\text{pixeles}}{\text{frames}} \right],$$

por lo que multiplicando este valor por b/a donde 1 s son $b\text{ pixeles}$ y 1 cm son $a\text{ pixeles}$ (b es 500 en todos los videos. la velocidad tendrá las unidades de

$$[V] = \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right].$$

Es por esto que se define *faconversion* con el valor mencionado anteriormente tomando en cuenta que la tasa de adquisición es la misma en todos los casos (500fps) y la equivalencia de centímetros a píxeles en el arreglo *factors*. A este proceso se le llama calibración de imagen. Del mismo modo se define un factor de conversión para pasar de radianes a grados.

Después de haber definido estos dos parámetros en la Sección [C.3](#) comenzamos con un ciclo *for* sobre el número de partículas después de aplicar el primero filtro. En este caso se utiliza de nuevo la función *find* ahora en el arreglo *tracking* para definir tres arreglos por cada rastreo: x , y y t . Antes de comenzar con la estimación de las velocidades; el numero de cuadros en los que aparece la partícula rastreada, el primer y último cuadro donde fue rastreada se guardan en las columnas 12, 13 y 14 de *results*. La posición inicial ($x(1)$ y $y(1)$) de cada rastreo en las columnas 15 y 16 respectivamente. Con ayuda de los arreglos mencionados anteriormente se calcula por cada partícula las componentes de la velocidad con diferencias hacia adelante y se guardan en las columnas 2 y 3. Seguido de esto se utilizan dos puntos adyacentes y la arcotangente para calcular el ángulo de inclinación con y sin signo en las columnas 2 y 3 del arreglo *theta*. En ambos arreglos *velocidad* y *theta* el primero columna corresponde a la etiqueta de cada rastreo.

```
k=1;%again two different counters
q=1;
faconversion=500/factores(count1, count2+4); %This is the
factor of conversion
%to pass of pixeles and frames to cm and s in both physical
scales
```

```

degreesfact=(180)/(pi);
for i=1:numpart %now we have less particles than before, and
the important
%number is numpart instead of numpartrast
a=find(tracking(:,1)==i);
n=length(a);
for j=1:n
x(j)=tracking(a(j),2);
y(j)=-tracking(a(j),3);
t(j)=tracking(a(j),4);
end
results(i,12) = n;
results(i,13) = min(t); %Initial and final frames where the
particle is
%tracked is important, so we save this general information
in array
%results
results(i,14) = max(t);
results(i,15) = x(1);
results(i,16) = y(1);
for l=1:n-1 %Computing of components of velocity with
forward differences
velocidad(q,1)=i; % Number of particle
velocidad(q,2)=faconversion*(x(1)-x(l+1))/(t(1)-t(l+1));
% x-component
velocidad(q,3)=faconversion*(y(1)-y(l+1))/(t(1)-t(l+1));
% y-component
q=q+1; %This enumerate velocities components
end

for p=1:n-1 %Computing inclination angle in degrees
theta(k,1)=i;
theta(k,2)= degreesfact*atan(abs((y(p+1)-y(p))/(x(p+1)-
x(p)))); %without sign
theta(k,3)= degreesfact*atan((y(p+1)-y(p))/(x(p+1)-x(p)
)); %with sing
k=k+1;
end
clear x;
clear y;
clear t;
end

```

Listing C.3: Cálculo de velocidades y ángulos de inclinación con diferencias hacia adelante en el caso de las velocidades y arcotangente en el caso de los ángulos de inclinación.

C.3. Promedios, desviaciones estándar y ángulos importantes guardados en *results*.

El procedimiento mostrado en la Sección [C.4](#) es muy similar al utilizado en la sección anterior ya que utilizando un ciclo *for* y la función *find* ahora en *velocidad*¹ definimos cuatro arreglos por cada rastreo: *vx*, *vy*, *anglews* y *angle* que contienen las componentes de la velocidad, y el ángulo de inclinación con y sin signo. De estos cuatro arreglos podemos guardar información importante en *results* mencionados en la Tabla [C.4](#) y en el arreglo *vmean* que se utilizará posteriormente para graficar la dispersión de velocidades promedio.

```

for i=1:numpart
a=find(velocidad(:,1)==i);
n=length(a);
for j=1:n %We create two vectors named vx and vy with
    components of
        % velocity computed
    vx(j)=velocidad(a(j),2);
    vy(j)=velocidad(a(j),3);
    anglews(j)=theta(a(j),2); %angle without sign
    angle(j)=theta(a(j),3);
end
vmean(i,1)=mean(vx); %After all this important information
    is saved in
%our general array results, and we use vmean to plot the
    scattering of
%mean velocities components
results(i,4)=mean(vx); %mean of x component
results(i,5)=std(vx); %standar deviation of x component
vmean(i,2)=mean(vy); %mean of y component
results(i,6)=mean(vy); %mean of y component
results(i,7)=std(vy); %standar deviation of y component
results(i,8)=sqrt((results(i,3)*results(i,3))+(results(i,5)
    *results(i,5)));
%magnitud of mean velocity
results(i,9)=angle(1); %initial angle without sign
results(i,10)=max(anglews); %maximum angle with sign
results(i,11)=min(anglews); %minimum angle with sign
results(i,17)=vx(1);
results(i,18)=vy(1);
clear vx;
clear vy;
clear angle;
end

```

¹En este caso no se hace sobre el arreglo *theta* debido a que ambos arreglos la columna 1 es la misma.

Listing C.4: Datos individuales guardados en *results*.

C.4. Segundo filtro por promedio de velocidades de las partículas

Este filtro se aplica solamente a los casos **2** y **3** puesto que es el resultado de haber caracterizado el movimiento del polvo en el caso **1**. Al principio de la sección [C.3](#) se definen dos contadores k y q que nos ayudarán a guardar los parámetros importantes (ver Tabla [C.4](#)) de las partículas que se consideran gotas en *finalresults* y las que se consideran polvo en *dustresults*. Como la velocidad promedio para cada partícula ya está en la columna 7 de *results*, se compara dentro de un ciclo *for* este valor con el umbral de velocidades definido anteriormente como $velmin = 25$ en *cm/s*. Es decir, todas aquellas partículas cuya velocidad sea menor a esta serán consideradas polvo. Utilizando un condicional *if* se guardan los parámetros importantes de las variables anteriormente mencionadas. Al final del ciclo *for* se guardan los tamaños de ambos arreglos para graficar estos resultados. Sin embargo en caso de que no haya rastreos que sean considerados como gotas se guarda simplemente la primer entrada de *results* en el arreglo *finalresults* para que al menos tenga un dato a la hora de graficar. Este valor no tienen ningún significado, simplemente se añade para evitar un error en las siguientes secciones.

```

velmin=25;%This is the threshold speed
k=1; % We use again two counters save the last particles that
    have speed
% greater than 25cm/s in the array named finalresults
q=1;% The other counter is to save particles whose speed is
    less than 25cm/s
% in the array windresults because, this particles are
    conciderated like
% wind

for i=1:numpart
    vel=results(i,7);
    if vel>=velmin
        finalresults(k,1)=results(i,1);
        finalresults(k,2)=results(i,2);
        finalresults(k,3)=results(i,3);
        finalresults(k,4)=results(i,4);
        finalresults(k,5)=results(i,5);
        finalresults(k,6)=results(i,6);
        finalresults(k,7)=results(i,7);
        finalresults(k,8)=results(i,8);
        finalresults(k,9)=results(i,9);
    end
end

```

```

    finalresults(k,10)=results(i,10);
    finalresults(k,12)=results(i,12);
    finalresults(k,13)=results(i,13);
    finalresults(k,14)=results(i,14);
    finalresults(k,15)=results(i,15);
    finalresults(k,16)=results(i,16);
    finalresults(k,17)=results(i,17);
    finalresults(k,18)=results(i,18);
    k=k+1;
    else
    dustresults(q,1)=results(i,1);
    dustresults(q,2)=results(i,2);
    dustresults(q,3)=results(i,3);
    dustresults(q,4)=results(i,4);
    dustresults(q,5)=results(i,5);
    dustresults(q,6)=results(i,6);
    dustresults(q,7)=results(i,7);
    dustresults(q,8)=results(i,8);
    dustresults(q,9)=results(i,9);
    dustresults(q,10)=results(i,10);
    dustresults(q,12)=results(i,12);
    dustresults(q,13)=results(i,13);
    q=q+1;
end
end

finalresults(1,:)=results(1,:); %When there isn't particles
    whose speed is
% greater than 25cm/s, we save the first row in final results
    to plot it,
% if we dont do it, we cannot plot all trajectories later

sizeofinalresults = size(finalresults,1); %To plot we have to
    know the size
%of to arrays, finalresults (droplets) and dustresults (dust)
sizedustresults = size(dustresults,1);

```

Listing C.5: Datos guardados después de aplicar el segundo filtro a los datos.

C.5. Arreglos guardados como archivos .csv

Al final guardamos 4 arreglos, *finalresults*, *finaltracking*, *vmean* y *dustresults*.

```

titlefinalresults=strcat('data',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),'.csv');

```

```

csvwrite(titlefinalresults,finalresults); %it only have an
    incorrect ratio
titlefinaltracking=strcat('droplettracking',num2str(count1,'%0.1
    i'),'_',num2str(count2,'%0.1i'),'csv');
csvwrite(titlefinaltracking,finaltraking); %It is going to be
    used to compute
%the ratio of particles
titlevmean=strcat('meanvelocity',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),'csv');
csvwrite(titlevmean,vmean);
titledustresults=strcat('dusttracking',num2str(count1,'%0.1i'),
    '_ ',num2str(count2,'%0.1i'),'csv');
csvwrite(titledustresults,dustresults);

```

Listing C.6: Arreglos con información importante guardados en formato *.csv*.

C.6. Obtención del diámetro de la partícula

El *plugin* utilizado no es muy bueno para calcular el tamaño de las partículas ya que el valor que le asigna al radio es el mismo en todos los casos. Por esta razón se utilizó principalmente la función *magic_wand* (ver en el apéndice [A](#) ²) de *Matlab* en el *script* mostrado en la Sección [C.7](#) para calcular el diámetro de las partículas rastreadas.

Debido a que este fue un *script* distinto, las variables guardadas en las secciones anteriores en archivos con extensión *.csv* tienen que ser cargados de nuevo para poder utilizarse. Las variables *count1* y *count2* se siguen utilizando para referirse al instrumento y la prueba tal como se muestra en la Tabla [C.2](#). Primero como se ha hecho recurrentemente para cada partícula rastreada se crean tres arreglos *x*, *y* y *t* donde se guardan las coordenadas espaciales y la temporal de cada rastreo. Como los vídeos están guardados como secuencias de imágenes, con esta información podemos conocer el cuadro y la posición exacta donde se encuentra cada partícula rastreada. Antes de aplicar la función *magic_wand* se debe recortar la imagen para ahorrar tiempo de procesamiento. Se considera una vecindad cuadrada de 20 píxeles por lado centrada en la posición de la partícula. En el caso de que la partícula este muy cerca al margen de la imagen este valor cambia a 4 píxeles.

Especificando una tolerancia para la escala de grises esta función devuelve una matriz del mismo tamaño de la imagen de entrada con solamente ceros y unos. Los ceros representan la luz reflejada por cada partícula, de este modo contándolos podemos estimar el tamaño de cada partícula en píxeles cuadrados para posteriormente con el arreglo *factors* estimarlo en centímetros cuadrados.

²Desarrollada por Daniel Lau (2023). *magicwand* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/130-magicwand>), MATLAB Central File Exchange

```

clear all
count1=7; %It counts the instruments
count2=2; %It counts melody or scales
Count1 = strcat(num2str(count1, '%0.1i'));
Count2 = strcat(num2str(count2, '%0.1i'));
titlefinaltracking=strcat('dropletracking',num2str(count1,'%0.1
    i'),'_',num2str(count2,'%0.1i'),'.csv');
titlefinalresults=strcat('data',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),'.csv');
finaltracking = xlsread(titlefinaltracking); %Reading to
    particle tracking file
finalresults = xlsread(titlefinalresults); %Reading to
    important parameters file
factors = xlsread('factors.xlsx');
numpartrast=max(finaltracking(:,1));
spacefact=1/factores(count1,count2+4);
cd ..;
cd (Count1);
cd(Count2);

for i=1:numpartrast
    a=find(finaltracking(:,1)==i);
    num=length(a);
        for j=1:num;
            t=finaltracking(a(j),7); % Every frame where particle
                is tracked is saved
            x=floor(finaltracking(a(j),5)); % Coordinate x where
                particle is tracked is saved in
            %variable x in pixels
            y=floor(finaltracking(a(j),6)); %Coordinate y, similar
                to x.
            cd('Video completo');
            Completeframe = strcat('frame',num2str(t+1,'%0.5i'),'.
                tiff');
            %The image where particle tracked is opened. Note,
                frame read is
            %t+1
            IM = imread(Completeframe);
            Im = imadjust(IM,[0.004 0.008]); %Brightness is
                adjusted by trial
            %and error values
            if (x<=1895 && y<=1055) && (x>=23 && y>=23) %We choose
                diferents
                %values of s depending of the area where particle
                    is tracked

```

```

%Here is in the center of the image
s=10;
for n = 1:4*s+1
    l=n+y-2*s;
    for m = 1:4*s+1
        k=m+x-2*s;
        Imcut(n,m)=Im(l,k);%Here the image is
            cropped in a
            % square neighborhood of 2*s per side
    end
end
elseif (x<=4 && x>=0) || (y<=4 && y>=0) %Top left
margin
s=2
for n = 1:4*s+1
    l=y+n;
    for m = 1:4*s+1
        k=x+m;
        Imcut(n,m)=Im(l,k);%Here the image is
            cropped in a
            % square neighborhood of 2*s per side
    end
end
elseif (x<=1920 && x>=1916) || (y<=1080 && y>=1076)%Up
right margin
s=2
for n = 1:4*s+1
    l=y-n;
    for m = 1:4*s+1
        k=x-m;
        Imcut(n,m)=Im(l,k);%Here the image is
            cropped in a
            % square neighborhood of 2*s per side
    end
end
else
s=2;
for n = 1:4*s+1
    l=n+y-2*s;
    for m = 1:4*s+1
        k=m+x-2*s;
        Imcut(n,m)=Im(l,k);%Here the image is
            cropped in a
            % square neighborhood of 2*s per side
    end
end

```

```

        end
    end
    %bin_mask is used to create a binary matrix
    cd ..
    bin_mask = magicwandbw(Imcut, [1 4*s], [1 4*s], 50)
        ;

    contador=0;
    for n=1:4*s+1
        for m=1:4*s+1
            if bin_mask(n,m)==0
                contador=contador+1;
            end
        end
    end
    size(a(j),2)=contador;%Array size has the area of every
    particle
    %in every point
    size(a(j),1)=i;
end

end

for i=1:numpartrast %Mean and standar deviation is computed in
square
    %pixels
    a=find(size(:,1)==i);
    num=length(a);
    for j=1:num
        area(j)=size(a(j),2);
    end
    Area(i,1)=i; %Particle number
    Area(i,2)=mean(area); %Mean (square pixels)
    Area(i,3)=std(area); %Standar deviation
    clear area
end

%Computing of diameter
Diameter(:,1)=Area(:,1);
for i=1:numpartrast
    Diameter(i,2)=2*sqrt(Area(i,2)/pi)*spacefact;%Diameter
    in square
    %pixels is saved
    finalresults(i,2)=Diameter(i,2);%Diameter in cm is
    saved
    Diameter(i,3)=Area(i,3)/(sqrt(pi*Area(i,2)))*spacefact;
end

```

```

    for k=13:-1:3
        finalresults(i,k+1)=finalresults(i,k);
    end
    finalresults(i,3)=Diameter(i,3);
end

titlefinalresults=strcat('data',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),' .csv');
csvwrite(titlefinalresults,finalresults);

```

Listing C.7: Cálculo del diámetro de las partículas recortando cada cuadro donde cada partícula es rastreada y utilizando la función *magic_wand*.

C.7. Cálculo del alcance con modelo de tiro parabólico

Debido a que no se encontraron gotas de saliva expulsadas de todos los instrumentos, en la Sección C.8 se comienza definiendo dos arreglos *count1* y *count2*. Ambos arreglos cuentan con 14 valores cada uno. Estos valores corresponden al mismo índice utilizado en la Tabla C.4 para los instrumentos y ejercicios en los que se encontraron gotas rastreadas. De este modo solamente se utiliza un ciclo *for*.

De acuerdo con las expresiones 3.1 y 3.2 hay que utilizar las posiciones de los pabellones de los instrumentos previamente guardados en el archivo *XY.csv* y cargados en el arreglo *XY*. También se guarda el valor de la altura medida desde el piso en metros del pabellón en el arreglo *h*. Posteriormente dentro de un ciclo *for* se guarda la información en *finalresults* del archivo *Datai_j.csv* de donde se obtienen la posición, velocidad y ángulo iniciales para calcular el alcance con la función *Rtp* previamente definida (ver apéndice B) y se guarda nuevamente con el mismo nombre.

```

clc;
close all;
clearvars;
% This program compute some important general results.

factores = xlsread('factores.xlsx'); %Again we use the factors
array!
XY = xlsread('XY.csv');%This array have the X and Y position of
the bell
count1 = [1 1 4 5 5 6 6 7 8 8 9 9 10 10]; %This is only for
instruments with dloplets tracking
count2 = [1 2 1 1 2 1 2 2 1 2 1 2 1 2]; %Instead use two
dimentions we use only one from 1 to 14
h = [0.5 0.5 1.2 0.8 0.8 1.1 1.1 1.1 0.6 0.6 1.1 1.1 1.1 1.1];
%This is the height of every bell

```

```

for i=1:14
    spacefact=1/factors(count1(i),count2(i)+4); %We are going
        to use this to work with physical scales, this is to
        convert px to cm
    X=XY(count1(i),2*(count2(i)-1)+1); %This x and y is the
        position of the bell
    Y=XY(count1(i),2*count2(i));
    titlefinalresults=strcat('Data',num2str(count1(i),'%0.1i'),
        '_ ',num2str(count2(i),'%0.1i'),'.csv');
    name = str(i);
    finalresults = xlsread(titlefinalresults);
    n(i) = size(finalresults,1);
    for j=1:n
        V0 = 0.01 * sqrt(power(finalresults(j,17),2)+power(
            finalresults(j,18),2)); %We need thhis value in m/s
        x0=finalresults(j,15); %initial x and y position
        y0=finalresults(j,16);
        theta = -finalresults(j,9); %Actually this angle is
            negative
        hp = h(i)+0.01*spacefact*(Y-y0); %The correction of the
            height
        Rp=Rtp(V0,theta,hp); %The function Rtp is used to
            compute the range
        R=Rp+0.01*spacefact*(X-x0); %A correction of range
        finalresults(j,19)=100*R; %The value is saved in cm
    end
    titlefinalresults=strcat('Datos',num2str(count1(i),'%0.1i')
        , '_ ',num2str(count2(i),'%0.1i'),'.csv');
    csvwrite(titlefinalresults,finalresults); %The array is
        saved again with the new information
end
end

```

Listing C.8: Cálculo del alcance con el modelo de tiro parabólico.

C.8. Gráficas

C.8.1. Máximo de intensidades

Las siguientes dos secciones se utilizan solamente para el caso **2** y **3** pues son representaciones gráficas sobre el máximo de intensidades del vídeo. En la Sección [C.9](#) se comienza definiendo la *figura (1)* que será el máximo de intensidades sobre todo el vídeo al que se refieran los valores de *count1* y *count2* con una escala de referencia en *cm*. Estos máximos de intensidad fueron calculados previamente con *FILJI* y nombrados como *MAX_i_j.tif*. Del mismo modo

se guardó la imagen de una regla de 10cm con el nombre *Escalas.jpg*. Con fines prácticos, se crean dos cadenas de caracteres que contiene el nombre de las imágenes mencionadas anteriormente para leerlas con la función *imread* que devuelve un arreglo en 2 dimensiones con el valor de escala de grises de cada píxel para cada imagen. Para mostrar el máximo de intensidades con la regla de referencia hay que reescalar la imagen de la regla utilizando la función *imresize* donde hay que especificar en píxeles el nuevo ancho y largo. Debido a que esta mide 10 cm de largo, debemos definir este valor como $factores(count1, count2 + 4) * 10$, y simplemente un ancho en que se distingan los números en la imagen que en este caso fue 100. Al reescalar la imagen podemos mostrar ambas imágenes utilizando las funciones *imshow* y *hold on*. Posteriormente se define una cadena de caracteres como *Maximo de intensidades_i_j.fig* que sera el nombre de la figura que guardara el programa.

```
figure(1) %This figure shows the maximum of intensity computed
        with FIJI along with
% a ruler of 10 cm of reference
image1=strcat('MAX_',num2str(count1,'%0.1i'),'_',num2str(count2
        ,'%0.1i'),' .tif');
%first is readed the image of the each instrument and part with
        indices
%count1 and count2 like we explained above
image2='Escalas.jpg'; %This the image's name of the ruler
im1=imread(image1); % In this part both images are readed and
        out in a matrix
%with their dimentions
im2=imread(image2);
imshow(im1); %The image1 is with their original dimentions
hold on %It is to show two images together
K = imresize(im2,[factores(count1, count2+4)*10 100]); %we have
        to resize
% the image 2 because is a ruler that is a reference, the
        lenght is 10 times
% the size of 1 cm, the width is fixed too and is 100
imshow(K);
title1='Maximo de intensidades '; %This is the title of the
        image to save
title(title1);
figura1=strcat('Maximo de intensidades',num2str(count1,'%0.1i')
        ,'_ ',num2str(count2,'%0.1i'),' .fig');
savefig(figura1); %This is the figure we're giong to save
```

Listing C.9: Obtención de la gráfica del máximo de intensidades sobre todo el video calculado previamente con *FIJI*.

C.8.2. Máximo de intensidades con trayectorias

En la Sección [C.10](#) se comienza definiendo dos factores de conversión espacial y temporal ya que aquí también se guardarán los parámetros mencionados en la Tabla [C.4](#) por separado para las partículas consideradas polvo y las que son consideradas como gotas de saliva. Después de esto el procedimiento mencionado en la Sección [C.9](#) se sigue para primero mostrar el máximo de intensidades con la referencia. Al utilizar de nuevo la función *hold on* se procede a graficar una a una las trayectorias de saliva y polvo en dos ciclos *for*, en estos se hace algo parecido en las Secciones [C.2](#), [C.3](#) y [C.4](#) utilizando la función *find* para definir arreglos con las coordenadas espaciales y temporal y graficarlas y al mismo tiempo guardar los parámetros importantes en los arreglos *finaltracking* y *finaldusttracking*. Al final al igual que en la Sección [C.9](#) se define una cadena de caracteres con el nombre de la figura que guarda el programa.

```
spacefact=1/factores(count1,count2+4); %In array factores an
    important
% value is the space fact given by the expresion above
timefact=1/500; % The frame rate is constant
figure(2)
image1=strcat('MAX_',num2str(count1,'%0.1i'),'_',num2str(count2
    ,'%0.1i'),' .tif');
image2='Escalas.jpg';
im1=imread(image1);
im2=imread(image2);
imshow(im1);
hold on
K = imresize(im2,[factores(count1, count2+4)*10 100]);
imshow(K);
k=1; %here we use two counters to plot the trajectoris on the
    previus image
q=1;
for i=1:sizefinalresults
    a=find(tracking(:,1)==finalresults(i,1)); %Here droplet
        trajectories are plotted
    n=length(a);
    clear x; %All variables used previously are cleaned
    clear y;
    clear t;
    for j=1:n %Here the final information about drops is saved
        in finaltracking array
            finaltraking(k,1)=i; %Particle number
            x(j)=tracking(a(j),2); %It is to plot
            finaltraking(k,2)=spacefact*tracking(a(j),2); %x
                physical coordinate
            y(j)=1080-(1080-tracking(a(j),3)); %It is to plot
            finaltraking(k,3)=-spacefact*tracking(a(j),3); % y
                physica; coordinate
```

```

t(j)=tracking(a(j),4); %It is to plot
finaltraking(k,4)=timefact*tracking(a(j),4); % time
    physical coordinate
finaltraking(k,5)=tracking(a(j),2); % x non-physical
    coordinate
finaltraking(k,6)=tracking(a(j),3); % y non-physical
    coordinate
finaltraking(k,7)=tracking(a(j),4); % t non-physical
    coordinate
k=k+1;
end
plot(x,y,'r','LineWidth',1);
hold on
end

for i=1:sizedustresults
a=find(tracking(:,1)==windresults(i,1)); %here we plot dust
    trajectories
n=length(a);
dustresults(i,11)=n;

clear x;
clear y;
clear t;
for j=1:n
    finaldusttraking(q,1)=i; %Particle number
x(j)=tracking(a(j),2); %It is to plot
    finaldusttraking(q,2)=spacefact*tracking(a(j),2); %x
        physical coordinate
y(j)=1080-(1080-tracking(a(j),3)); %It is to plot
    finaldusttraking(q,3)=-spacefact*tracking(a(j),3); % y
        physical coordinate
t(j)=tracking(a(j),4); %It is to plot
    finaldusttraking(q,4)=timefact*tracking(a(j),4); % time
        physical coordinate
finaldusttraking(q,5)=tracking(a(j),2); % x non-
    physical coordinate
finaldusttraking(q,6)=tracking(a(j),3); % y non-
    physical coordinate
finaldusttraking(q,7)=tracking(a(j),4); % t non-
    physical coordinate
q=q+1;
end
plot(x,y,'Color','#FF00FF','LineWidth',1);

```

```

    hold on
end
xlabel('x (px)'); %Here we put the name of the axis
ylabel('y (px)');
title1=strcat('Trayectorias de particulas con maximo',num2str(
    count1,'%0.1i'),' ',num2str(count2,'%0.1i'));
title(title1);
figura2=strcat('Trayectorias',num2str(count1,'%0.1i'),'_',
    num2str(count2,'%0.1i'),'fig');
savefig(figura2); %And is saved

```

Listing C.10: Obtención de la grafica del máximo de intensidades sobre todo el video con las trayectorias de gotas y polvo y se guardan los parámetros mencionados en la Tabla C.4 en los arreglos que finalmente se exportan en formato *.csv*.

C.8.3. Dispersión de velocidades promedio

En la Sección C.11 se empieza definiendo *figure(4)*. En la Sección C.10 de había definido *figure(2)*. Sin embargo no se muestra la sección del código donde esta *figure(3)* ya que es básicamente las trayectorias de las partículas pero sin el fondo de referencia. En el Caso 1 también se aplicó esta sección del código a diferencia de los dos anteriores, y fue ahí donde se encontró que el 99.8% de las partículas de polvo tenían una velocidad menor a 25 *cm/s* por lo que puede considerarse un buen umbral. En este caso se utiliza la función *scatter* en donde tenemos que especificar las componentes de los puntos que serán representados (componentes de *vmean*), su tamaño (10) y el color (rojo). También se incluye en la misma gráfica un círculo con radio igual a 25 *cm/s*.

```

figure(4)
sz=10; % Size of dots in scattering plot
scatter(vmean(:,1),vmean(:,2),sz,'r'); % r is for color red of
    dots
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
xlabel('Vx (cm/s)');
ylabel('Vy (cm/s)');
title2='Dispersion de velocidades '
title(title2);
hold all
R=velmin;
x1 = -R:R/100:R;
y1 = sqrt(R*R-x1.*x1);
y2 = -sqrt(R*R-x1.*x1);
plot(x1,y1,x1,y2,'Color','#0072BD','LineWidth',2);
daspect([1 1 1]); % It is to put all axis with the same size

```

```

figura4=strcat('Dispersion',num2str(count1,'%0.1i'),'_',num2str
(count2,'%0.1i'),'fig');
savefig(figura4);

```

Listing C.11: Obtención de gráfica de dispersión de velocidades promedio de las componentes de la velocidad.

C.8.4. Diámetros de las partículas rastreadas por instrumento

Al igual que en la Sección [C.8](#), en la Sección [C.12](#) se utilizan los mismos arreglos *count1* y *count2* para los instrumentos donde si hubo gotas rastreadas. En este caso se utilizó la función *errorbar* para hacer la grafica del tamaño con su respectiva desviación estándar de las partículas utilizando las columnas 2 y 3 del arreglo *finalresults*. También se calculó el diámetro mínimo y máximo para todos los instrumentos.

```

figure(1)
for i=1:14
    titlefinalresults =strcat('Data',num2str(count1(i),'%0.1i')
        ,'_ ',num2str(count2(i),'%0.1i'),'csv'); %File Datai_j
        is read to use columns 2 and 3
    name = str(i); %This is used to save the name of instrument
        and exercise
    finalresults = xlsread(titlefinalresults); %The information
        of data is saved in finalreults
    n(i) = size(finalresults,1); %this is the number of
        particles tracked by file
    dmin(i) = min(finalresults(:,2)); %An array with minimum
        and maximum valor of diameter is created
    dmax(i) = max(finalresults(:,2));
    e=errorbar(finalresults(:,2),finalresults(:,3),'o','
        DisplayName',name);%Here is graphed every file
    e.LineWidth = 1;
    hold on
    legend
end
xlabel('Numero de gota'); %Labels
ylabel('d (cm)');
title('Diametros de las gotas rastreadas');

min = min(dmin); %General minimum and maximum
max = max(dmax);

```

Listing C.12: Obtención de la gráfica del diámetro de las partículas por instrumento con su respectiva desviación estándar.

C.8.5. Alcance y gráficas de barras

Con los arreglos definidos en la Sección [C.8](#): *count1*, *count2* se abren los archivos *Datai_j* que contienen los alcances calculados previamente en la misma sección, después con ayuda del arreglo *str* que contiene los nombres de los instrumento y el ejercicio ejecutado se agrega la leyenda correspondiente. Se define de igual modo un arreglo *n* que contiene el número de partículas y el arreglo *range* que tiene el promedio y la desviación estándar, ambos para cada instrumento en su correspondiente ejercicio.

Después se crean dos nuevos arreglos *Count1* y *Count2* en este caso para tratar las gotas rastreadas durante el ejercicio a diferentes niveles dinámicos. Lo que hace el programa es fijarse en el primer cuadro en que se rastrea cada gota correspondiente a la columna 13 de *finalresults*. Si esta en la primera mitad del video aumenta el valor en uno al contador *k* en el caso en que se encuentre en la segunda mitad del video lo hace con el contador *l*, al final de cada instrumento estos valores se guardan en el arreglo *dym* que se utiliza para graficar.

Al final se obtienen las gráficas de barras del número de gotas rastreado para cada instrumento en cada ejercicio, después del numero de gotas en *mf* y *ff* y por ultimo del valor promedio del alcance con desviación estándar.

```
figure(2)
for i=1:14
    titlefinalresults=strcat('Data',num2str(count1(i),'%0.1i'),
        '_ ',num2str(count2(i),'%0.1i'),' .csv');
    name = str(i);
    finalresults = xlsread(titlefinalresults);
    n(i) = size(finalresults,1);
    name = str(i);
    plot(finalresults(:,19),'-o','DisplayName',name); %Then is
        plotted with its name
    legend
    hold on

    range(i,1) = mean(finalresults(:,19));
    range(i,2) = std(finalresults(:,19));
end

Count1 = [1 5 6 7 8 9 10]; %This array is to separate the
    droplets in the two different dynamic levels mf and ff
Count2 = [2 2 2 2 2 2 2];

for i=1:7 %
    k=0; %this two parameters count droplets in every dynamic
        level
    l=0;
    titlefinalresults =strcat('Datos',num2str(Count1(i),'%0.1i')
```

```

    ), '_' , num2str(Count2(i), '%0.1i'), '.csv');
    finalresults = xlsread(titlefinalresults);
    m=size(finalresults,1);
    for j=1:m
        if finalresults(j,13)<5000
            k=k+1;
        else
            l=l+1;
        end
    end
    dym(i,1)=k; %This array have the number of droplets in
                every level
    dym(i,2)=l;
end
%Here the number of general excersice is plotted
X = categorical({'Clarinete Melodia','Clarinete escalas','Fagot
    Melodia', 'Agujeros fagot melodia', 'Agujeros fagot escalas
    ', 'Flata melodia', 'Flauta escalas', 'Pie de flauta escalas
    ', 'Oboe melodia', 'Oboe escalas', 'Piccolo melodia' ,'
    Piccolo escalas', 'Trombon melodia', 'Trombon escalas'});
X = reordercats(X,{'Clarinete Melodia','Clarinete escalas','
    Fagot Melodia', 'Agujeros fagot melodia', 'Agujeros fagot
    escalas', 'Flata melodia', 'Flauta escalas', 'Pie de flauta
    escalas', 'Oboe melodia', 'Oboe escalas', 'Piccolo melodia'
    , 'Piccolo escalas', 'Trombon melodia', 'Trombon escalas'});
bar(X,n)
xlabel('Instrumento');
ylabel('Numero de gotas');
title('Gotas rastreadas por instrumento');

%Here of the dynamic levels
x = [1 2 3 4 5 6 7];
b = bar(x,dym);
xlabel('Instrumento');
ylabel('Numero de gotas');
title('Gotas rastreadas por instrumento para diferentes niveles
    dinamicos');

bar(X,range(:,1))

hold on

er = errorbar(range(:,1),range(:,2),'-o');
er.Color = [0 0 0];
er.LineStyle = 'none';

```

Listing C.13: Obtención de la grafica de alcance para todas las gotas rastreadas por instrumento, y gráficas de barras con el numero de gotas encontradas para cada instrumento y específicamente en *mf* y *ff*.

Referencias

- [1] Harapan, H., Itoh, N., Yufika, A., Winardi, W., Keam, S., Te, H., Megawati, D., Hayati, Z., Wagner, A. L., Mudatsir, M. (2020). Coronavirus disease 2019 (COVID-19): A literature review. *Journal of Infection and Public Health*, 13(5), 667-673.
- [2] Ganczak, M., Pasek, O., Duda-Duma, Ł., Świstara, D., & Korzeń, M. (2021). Use of masks in public places in Poland during SARS-Cov-2 epidemic: a covert observational study. *BMC Public Health*, 21(1), 1-10.
- [3] Kowalski, W. J., & Bahnfleth, W. P. (1998). Airborne respiratory diseases and mechanical systems for control of microbes. *HPAC Heating, Piping, Air Conditioning*, 70(7).
- [4] de Almeida, P. D. V., Gregio, A. M., Machado, M. A., De Lima, A. A., & Azevedo, L. R. (2008). Saliva composition and functions: a comprehensive review. *J contemp dent pract*, 9(3), 72-80.
- [5] Charlotte, N. (2020). High rate of SARS-CoV-2 transmission due to choir practice in France at the beginning of the COVID-19 pandemic. *Journal of Voice*.
- [6] Clanet, C. (2015). Sports ballistics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47, 455-478.
- [7] Cohen, C., Darbois-Textier, B., Dupeux, G., Brunel, E., Quéré, D., & Clanet, C. (2014). The aerodynamic wall. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2161), 20130497.
- [8] Hedworth, H. A., Karam, M., McConnell, J., Sutherland, J. C., & Saad, T. (2021). Mitigation strategies for airborne disease transmission in orchestras using computational fluid dynamics. *Science Advances*, 7(26), eabg4511.
- [9] He, R., Gao, L., Trifonov, M., & Hong, J. (2021). Aerosol generation from different wind instruments. *Journal of aerosol science*, 151, 105669.
- [10] Brosseau, Q., Ran, R., Graham, I., Jerolmack, D. J., & Arratia, P. E. (2022). Flow and aerosol dispersion from wind musical instruments. *Physics of Fluids*, 34(8), 087115.
- [11] Anfinrud, P., Stadnytskyi, V., Bax, C. E., & Bax, A. (2020). Visualizing speech-generated oral fluid droplets with laser light scattering. *New England Journal of Medicine*, 382(21), 2061-2063.

- [12] Kong, H., Akakin, H. C., & Sarma, S. E. (2013). A generalized Laplacian of Gaussian filter for blob detection and its applications. *IEEE transactions on cybernetics*, 43(6), 1719-1733.
- [13] Takehara, K., Adrian, R. J., Etoh, G. T., & Christensen, K. T. (2000). A Kalman tracker for super-resolution PIV. *Experiments in Fluids*, 29(Suppl 1), S034-S041.

Bibliografía

- [1] Sofi, M. S., Hamid, A., & Bhat, S. U. (2020). SARS-CoV-2: A critical review of its history, pathogenesis, transmission, diagnosis and treatment. *Biosafety and health*, 2(04), 217-225.

