

---

# Análisis experimental del Palo Volador: comparación con un modelo teórico y analogías con movimientos astronómicos

---

Magdalena Ixchel Esquina Macario





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y humanidades




**Análisis experimental del Palo Volador: comparación  
con un modelo teórico y analogías con movimientos  
astronómicos**

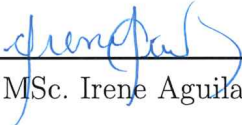
Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Magdalena Ixchel Esquina Macario  
para optar al grado académico de Licenciada en Física


Guatemala  
2026

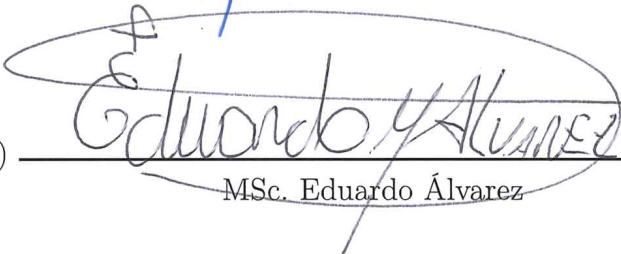
Vo.Bo.:

(f)   
MSc. Irene Aguilar

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Irene Aguilar

(f)   
MA. Isolda Fortín

(f)   
MSc. Eduardo Álvarez

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de enero del 2026.

*Una danza gobernada por el tiempo que vuela,  
el curso de los años que suceden sin alcanzarse.  
Cautivador e imponente en cada giro,  
el danzante ensaya su lugar en el universo.  
La geometría se vuelve movimiento.  
Las cuerdas narran historias,  
y un ritual que trasciende generaciones.*

Esta tesis nació cuando decidí acompañar a mi hermano a Chichicastenango, Quiché, en diciembre del 2022, donde tuve la oportunidad de apreciar la danza del Palo Volador por primera vez. Para mí fue impactante observar su altura y su mecanismo, además de lo impresionante que fue ver a dos personas atadas descendiendo con solamente una cuerda. Con mis conocimientos adquiridos durante la carrera, en cursos como física experimental, mecánica clásica e introducción a la astronomía, logré realizar un estudio preliminar del Palo Volador en diferentes locaciones de Guatemala, convirtiéndome de forma inesperada pionera en un estudio de este tipo.

En el capítulo uno se encuentra la introducción y el contexto de este trabajo. En el capítulo 2 se encuentran los objetivos generales y específicos que aborda el estudio. En el capítulo 3 se tiene la justificación. En el capítulo 4 se tiene el marco teórico, se hace una introducción al Palo Volador, su simbolismo, además de conceptos físicos como mecánica lagrangiana y las leyes de Kepler, finalmente, se tienen las técnicas de regresión usadas y algunos conceptos matemáticos. En el capítulo 5 se encuentra el modelo teórico existente del Palo Volador y los antecedentes del estudio. En el capítulo 6 se tiene la metodología para la recolección de datos de los Palos Voladores y la construcción de la réplica del Palo Volador con las dimensiones del artículo de referencia. En el capítulo 7 se encuentran los resultados de las variables del sistema analizados, se cuenta con los conjuntos de datos y sus respectivos ajustes para la comparación. En los capítulos 8 y 9 se tiene la discusión de resultados y las conclusiones. Finalmente, en los capítulos 10 y 11 se tienen las recomendaciones y bibliografía utilizada.

---

## Agradecimientos

---

Expreso mi agradecimiento a:

A mi padre, Pedro Esquina, porque me dio la oportunidad de estudiar en la universidad y brindarme aquello que él no pudo tener en su tiempo. Por heredarme la resiliencia que tiene, porque sé que gracias a ello logré terminar este proyecto y sé que me acompañará en los proyectos que me proponga en el futuro.

A mi madre, María Macario, por su apoyo y por motivarme a seguir adelante, por darme a mí y mis hermanos los estudios que ella no tuvo.

A mis hermanas y hermanos, Josefa Esquina, José Esquina, Pedro Esquina, María Esquina y Nicolasa Esquina, por ser un ejemplo a seguir para mí.

A mi asesora MSc. Irene Aguilar, por motivarme y creer en mí durante la carrera, por su comprensión y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Su tiempo y dedicación fuera y dentro de lo institucional fueron vitales, y por compartir sus conocimientos con mi persona. Su legado prevalecerá en el tiempo y perdura en generaciones de físicos.

A mis maestros matemáticos, Lic. Gaspar Yataz, MFin. Mario Castillo y MSc. Dorval Carias. Aunque no fueron partícipes en este trabajo, agradezco su apoyo y acompañamiento cuando fui su alumna. Y por enseñarme la belleza de las matemáticas puras.

A MA. Isolda Fortín y MBA. Andrés Ceballos, por su apoyo en la primera toma de datos que tuvo este trabajo, y el apoyo del Departamento de Antropología.

A mis gatos, cuya compañía silenciosa y constante me brindó serenidad en los momentos de mayor esfuerzo.

A mí, por creer en mis sueños y planes. Este trabajo reveló una pasión inesperada: el pilotaje de drones.

<b>Prefacio</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XIII</b>
<b>Glosario</b>	<b>XVIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XX</b>
<b>1. Introducción y contexto</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	2
2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
<b>3. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
4.1. Introducción al Palo Volador . . . . .	4
4.1.1. El Palo Volador desde la física . . . . .	5
4.1.2. Simbolismo del Palo Volador desde la astronomía . . . . .	5
4.1.3. Partes del Palo Volador . . . . .	8
4.2. Mecánica lagrangiana . . . . .	10
4.2.1. Fundamentos de la mecánica lagrangiana . . . . .	10
4.2.2. Espacio de fase . . . . .	10
4.2.3. Ecuaciones de Euler-Lagrange . . . . .	10
4.3. Leyes de Kepler . . . . .	11
4.3.1. Péndulo esférico como analogía a la segunda ley de Kepler . . . . .	11
4.4. Ajustes de regresión y regresión simbólica . . . . .	13
4.5. Conceptos matemáticos . . . . .	16

<b>5. Antecedentes</b>	<b>17</b>
5.1. Modelo teórico del artículo: <i>Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky</i> . . . . .	17
<b>6. Metodología</b>	<b>20</b>
6.1. Recolección de datos del Palo Volador . . . . .	20
6.1.1. Ubicaciones de los tres Palos Voladores . . . . .	24
6.1.2. Diagrama de flujo de la metodología usada en los Palos Voladores . . . . .	26
6.2. Construcción de la réplica del dispositivo experimental del artículo <i>Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky</i> . . . . .	27
6.3. Toma de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	29
6.4. Procesamiento de datos . . . . .	30
<b>7. Resultados</b>	<b>31</b>
7.1. Comparación de datos reales con el modelo teórico del artículo de referencia . . . . .	31
7.2. El Palo Volador y las leyes de Kepler . . . . .	64
<b>8. Discusión</b>	<b>67</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>72</b>
<b>10.Recomendaciones</b>	<b>73</b>
<b>11.Bibliografía</b>	<b>74</b>
. . . . .	74
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>
<b>Anexos</b>	<b>76</b>
<b>A. Datos de la réplica del dispositivo experimental</b>	<b>76</b>
<b>B. Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental</b>	<b>77</b>
<b>C. Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental</b>	<b>78</b>
<b>D. Datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá</b>	<b>79</b>
<b>E. Datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, visto desde arriba</b>	<b>80</b>
<b>F. Datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché</b>	<b>81</b>
<b>G. Ajustes de los datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché</b>	<b>82</b>
<b>H. Descripción de los municipios</b>	<b>83</b>
<b>I. Mapa general con los municipios de los Palos Voladores</b>	<b>85</b>

---

## Lista de figuras

---

4.1. Voladores sujetos por cuerdas que descienden desde el punto más elevado hasta alcanzar el nivel del suelo . . . . .	4
4.2. Trayectoria antihoraria y relación con los cuatro puntos cardinales . . . . .	6
4.3. Partes del dispositivo giratorio del Palo Volador en Chichicastenango, Quiché, Guatemala . . . . .	8
4.4. Partes del dispositivo giratorio de los Voladores de Papantla en San Luis Potosí, México	8
4.5. Partes del Palo Volador . . . . .	9
4.6. Sistema del péndulo esférico como una analogía a la segunda ley de Kepler . . . . .	11
4.7. Gráfica de un péndulo esférico, mostrando los puntos, vectores y áreas . . . . .	12
4.8. Bucle interno de PySR . . . . .	13
4.9. Ejemplo de la operación de mutación aplicada a un árbol de expresión . . . . .	14
4.10. Ejemplo de la operación de cruce aplicada a dos árboles de expresiones . . . . .	14
4.11. Regresión simbólica (vista del usuario) . . . . .	15
5.1. Sistema de coordenadas esféricas para un volador . . . . .	17
5.2. Se muestra el diagrama de fase de la longitud, ángulo cenital y ángulo azimutal respectivamente . . . . .	19
5.3. Diferentes partes del dispositivo experimental . . . . .	19
6.1. Vista desde el cenit capturada por un dron, desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	21
6.2. Imagen capturada con el dron, desde la parte lateral al Palo Volador en Joyabaj, Quiché	22
6.3. Vista desde el cenit capturada por un dron, desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	22
6.4. Imagen capturada con el dron, desde la parte lateral al Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	23
6.5. Vista Cenital capturada por un dron desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en Chichicastenango, Quiché . . . . .	23
6.6. Santo Tomás Chichicastenango, Quiché, Guatemala . . . . .	24
6.7. Santa María Joyabaj, Quiché, Guatemala . . . . .	24
6.8. San Pedro La Laguna, Sololá, Guatemala . . . . .	25
6.9. Diagrama de flujo de la recolección y procesamiento de datos de los Palos Voladores	26
6.10. Impresión en 3D de una de las esferas para el dispositivo experimental . . . . .	27
6.11. Impresión en 3D para la parte rotatoria . . . . .	27
6.12. Piezas impresas en 3D . . . . .	27
6.13. Réplica del dispositivo experimental . . . . .	28
6.14. Réplica del Palo Volador visto desde el cenit . . . . .	29

6.15. Réplica del Palo Volador desde la parte lateral . . . . .	29
6.16. Trayectoria del dispositivo experimental en <i>tracker</i> . . . . .	30
7.1. Dispositivo experimental del artículo . . . . .	31
7.2. Réplica del dispositivo experimental . . . . .	31
7.3. Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	32
7.4. Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	32
7.5. Simulación del modelo teórico del artículo. Comparación de la coordenada $z$ entre la simulación numérica y datos experimentales. Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico . . . . .	33
7.6. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $z$ en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	33
7.7. Gráfica de residuos de la coordenada $z$ para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	33
7.8. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $z$ en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	33
7.9. Gráfica de residuos de la coordenada $z$ para el conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	33
7.10. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $z$ en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	34
7.11. Gráfica de residuos de la coordenada $z$ para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	34
7.12. Diagrama de fase de la altura obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	35
7.13. Diagrama de fase de la altura obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	35
7.14. Diagrama de fase de la altura obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	35
7.15. Velocidades de la altura en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	36
7.16. Velocidades de la altura en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	36
7.17. Velocidad de la altura en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	36
7.18. Simulación numérica para el diagrama de fase de la coordenada $\rho$ . Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico . . . . .	37
7.19. Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos del dispositivo experimental . . . . .	37
7.20. Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	37
7.21. Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	38
7.22. Ajuste cuadrático al modelo teórico para la longitud de la cuerda en función del tiempo . . . . .	39
7.23. Gráfica de residuos del ajuste al modelo teórico para la longitud de la cuerda . . . . .	39
7.24. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $\rho$ en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	39
7.25. Gráfica de residuos de la coordenada $\rho$ para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	39
7.26. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $\rho$ en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	39
7.27. Gráfica de residuos de la coordenada $\rho$ para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	39
7.28. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada $\rho$ en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	40

7.29. Gráfica de residuos de la coordenada $\rho$ para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	40
7.30. Velocidades de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	41
7.31. Velocidades de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	41
7.32. Velocidad de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	41
7.33. Simulación numérica de la coordenada $\theta$ en función del tiempo en la esquina superior derecha. Los puntos en colores son el diagrama de fase de la coordenada $\theta$ . . . . .	42
7.34. Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada $\theta$ en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	42
7.35. Gráfica de residuos de la coordenada $\theta$ para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	42
7.36. Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada $\theta$ en función del tiempo para dos conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	42
7.37. Gráfica de residuos de la coordenada $\theta$ para el conjunto de datos del video 4 del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	42
7.38. Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada $\theta$ en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	43
7.39. Gráfica de residuos de la coordenada $\theta$ para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	43
7.40. Diagrama de fase del ángulo cenital obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos en la réplica del dispositivo experimental . . . . .	44
7.41. Diagrama de fase del ángulo cenital obtenidas a partir de los ajustes realizados a 2 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	44
7.42. Diagrama de fase del ángulo cenital obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	44
7.43. Velocidades del ángulo cenital en función del tiempo, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	45
7.44. Velocidades del ángulo cenital en función del tiempo, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 2 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	45
7.45. Velocidad del ángulo cenital obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	45
7.46. Dispositivo experimental del artículo de referencia visto desde arriba . . . . .	46
7.47. Réplica del dispositivo experimental visto desde arriba . . . . .	46
7.48. Palo Volador en Joyabaj, Quiché visto desde arriba . . . . .	46
7.49. Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá visto desde arriba . . . . .	46
7.50. Simulación numérica para el diagrama de fase de la coordenada $\varphi$ . Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico . . . . .	47
7.51. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 8 de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	47
7.52. Diagrama de fase del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 8 . . . . .	47
7.53. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	47
7.54. Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 1 . . . . .	47
7.55. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	48

7.56. Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 2 . . . . .	48
7.57. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental	49
7.58. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental . . . . .	49
7.59. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . .	49
7.60. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	49
7.61. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	50
7.62. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	50
7.63. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental .	51
7.64. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . .	51
7.65. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	51
7.66. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . .	52
7.67. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	52
7.68. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . .	52
7.69. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	52
7.70. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . .	52
7.71. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	52
7.72. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada $\varphi$ en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . .	53
7.73. Gráfica de residuos de la coordenada $\varphi$ para el conjunto de datos del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	53
7.74. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	53
7.75. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	53
7.76. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	54
7.77. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	54
7.78. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 2, video 3, video 4 y video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	55
7.79. Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La obtención de la gráfica fue a partir de las derivadas de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 2, video 3, video 4 y video 5 . . . . .	55

7.80. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental 55

7.81. Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 55

7.82. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 10 de la réplica del dispositivo experimental 56

7.83. Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 10 de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 56

7.84. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 5 de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 56

7.85. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 10 de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 56

7.86. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 5 y video 10 de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 57

7.87. Diagrama de fase del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental. La obtención de la gráfica fue a partir de las derivadas de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 5 y video 10 . . . . . 57

7.88. Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 57

7.89. Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 57

7.90. Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 58

7.91. Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 1 . . . . . 58

7.92. Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 58

7.93. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $r$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 59

7.94. Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del video 10 . . . . . 59

7.95. Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $r$  en función del tiempo a los datos obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . . 59

7.96. Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del video 4 . . . . . 59

7.97. Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $r$  en función del tiempo a los datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 60

7.98. Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna . . . . . 60

7.99. Diagrama de fase del radio, obtenido a partir de ajustes realizados a tres conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 60

7.100 Diagrama de fase del radio, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . . 60

7.101 Diagrama de fase del radio obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 61

7.102 Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir de los ajustes realizados a tres conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental . . . . . 61

7.103 Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . . 61

7.104 Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . . 62

7.105	Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada $r$ en función del tiempo a los datos obtenidos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	62
7.106	Gráfico de residuos de la coordenada $r$ para el conjunto de datos del video 3 . . . . .	62
7.107	Diagrama de fase del radio, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	63
7.108	Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché . . . . .	63
7.109	Área contra tiempo del Palo Volador de Chichicastenango, Quiché . . . . .	64
7.110	Primera vuelta del Palo Volador de Chichicastenango, Quiché . . . . .	65
7.111	Área contra tiempo del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	65
7.112	Primera vuelta del Palo Volador de Joyabaj, Quiché . . . . .	66
A.1.	Datos brutos de 30 datos tabulados en Excel . . . . .	76
B.1.	Ajustes del dispositivo experimental para cada variable . . . . .	77
C.1.	Ajustes del dispositivo experimental para cada variable . . . . .	78
D.1.	Datos brutos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	79
E.1.	Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché visto desde arriba . . . . .	80
F.1.	Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché desde el lado lateral . . . . .	81
G.1.	Ajustes del Palo Volador en Joyabaj, Quiché desde el lado lateral . . . . .	82
I.1.	Mapa general con las locaciones de los Palos Voladores estudiados . . . . .	85

---

## Lista de cuadros

---

4.1. Cuadro comparativo entre el Palo Volador de Guatemala y los Voladores de Papantla en México . . . . .	5
5.1. Materiales y dimensiones del dispositivo experimental del artículo de referencia . . . .	19
7.1. Tabla de comparación de materiales en el dispositivo experimental del artículo de referencia, réplica del dispositivo experimental, el Palo Volador en Joyabaj, Quiché y el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá . . . . .	32
7.2. Área e incertidumbre de los datos experimentales en Chichicastenango, Quiché . . .	64
7.3. Área e incertidumbre de los datos experimentales en Joyabaj, Quiché . . . . .	66

**Acelerómetro:** es un sensor que mide la aceleración, inclinación y vibración. Detecta cambios de velocidad o la orientación de un objeto.

**Ajuste Cúbico:** es una técnica de regresión polinómica de tercer grado, se busca encontrar la curva que mejor representa un conjunto de datos.

**Ajustes de regresión:** es una técnica estadística que encuentra la curva que mejor aproxima los datos. Modela la relación entre una variable dependiente Y y una independiente X.

**Ángulo:** figura geométrica formada por dos lados que parten de un vértice.

**Ángulo azimutal:** en coordenadas esféricas representa la rotación horizontal de un punto alrededor de eje  $z$ . Se encuentra en el plano  $xy$  y de un rango de 0 a  $2\pi$ .

**Ángulo cenital:** en coordenadas esféricas es el ángulo medido desde el eje  $z$  hasta el vector posición en el punto. Tiene un rango de 0 a  $\pi$ .

**Árbol de expresión:** es una estructura de datos para representar expresiones algebraicas, tiene una estructura jerárquica que refleja la prioridad de las operaciones.

**Axis mundi:** en un sentido mitológico, religioso y filosófico representa el centro del universo, es un punto sagrado entre el cielo, la tierra y el inframundo.

**Calibrar:** se utiliza para definir la escala espacial. En Tracker se usa la vara de calibración.

**Cenit:** está situado verticalmente sobre la cabeza del observador, forma un ángulo de 90 grados con el horizonte.

**Coefficiente de determinación:** es una medida estadística que indica la proporción de la variación en la variable dependiente  $Y$  explicada por la variable independiente  $X$ .

**Coordenadas generalizadas:** son un conjunto de parámetros que definen un sistema mecánico. Pueden ser ángulos, longitudes o cualquier parámetro según la posición.

**Cruce:** se refiere al proceso por el cual los individuos dentro de una población se reproducen entre sí.

**Derivadas:** mide la tasa de cambio instantánea de una función respecto a la variable independiente.

**Diagrama de fase:** el diagrama de fase muestra el estado del sistema. Naturalmente descrito por la posición y la forma en que se mueve.

**Diámetro:** segmento de línea que une dos puntos opuestos, este pasa por el centro.

**Dirección ortogonal:** que forma un ángulo recto (90 grados) respecto al otro.

**Ecuaciones acopladas:** son ecuaciones que están interconectadas, no se pueden resolver de forma independiente, debe ser resuelto de manera simultánea para encontrar una solución conjunta.

**Ecuaciones de lagrange:** son un formalismo de la mecánica analítica que define el movimiento de un sistema físico mediante el lagrangiano (energía cinética menos potencial). Estas son equivalentes a las leyes de Newton.

**Energía cinética:** es la forma de energía que posee un objeto debido a su movimiento. Expresada con  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ .

**Energía potencial:** es la energía de un objeto debido a su posición.

**Error sistémico:** es una desviación constante del valor real en las mediciones, provocada por una mala calibración o instrumentos defectuosos.

**Excentricidad:** es un parámetro adimensional, este es definido como la razón entre la distancia del centro al foco y la longitud del semieje mayor. Su valor se encuentra en una elipse como  $0 < e < 1$ . Si la excentricidad es 0, la figura es un círculo perfecto. Si la excentricidad es cerca de 1, la elipse es elongada.

**Foco:** los focos son dos puntos situados en el semieje mayor, estos son equidistantes del centro.

**Funcional:** es una función que va de un conjunto de funciones a un conjunto de valores.

**Giro antihorario:** movimiento de rotación opuesto a las agujas del reloj, es decir, se mueve a la izquierda.

**Giroscopio:** es un sensor que mide la velocidad de rotación. Helicoidal: describe algo que tiene forma o movimiento de hélice.

**Helicoide:** es una superficie en 3D que se genera al girar una recta mientras se desplaza hacia arriba, análogamente a un tornillo.

**Incertidumbre:** margen de error al medir una magnitud física.

**Leyes de Kepler:** describen matemáticamente el movimiento de los planetas alrededor del Sol.

**Mástil:** en el Palo Volador es el poste de madera que mide alrededor de 30 m.

**Método numérico:** es un procedimiento iterativo que busca aproximaciones a soluciones de problemas que involucran ecuaciones, sistemas e integrales.

**Método Runge Kutta:** son usadas para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias.

**Mínimos cuadrados no lineales:** es un método de optimización que ajusta un modelo no lineal en sus parámetros al conjunto de datos analizados.

**Momento:** mide la cantidad de movimiento de un cuerpo según su masa y velocidad.

**Monótona creciente:** es tal que nunca disminuye a medida que aumenta su variable independiente.

**Monótona decreciente:** es tal que nunca aumenta a medida que aumenta su variable independiente.

**Mutación:** es una alteración en la secuencia de ADN.

**Números reales:** son el conjunto que incluye los números racionales (fracciones, enteros y naturales) e irracionales.

**Optimización:** consiste en encontrar los valores máximos o mínimos de una función.

**Órbita:** es la trayectoria que describe un cuerpo bajo la influencia de una fuerza central. Por ejemplo, la tierra gira alrededor del Sol con una órbita elíptica, donde el Sol es uno de los focos.

**Orbitas elípticas:** trayectoria en forma de elipse que tiene un cuerpo celeste alrededor de otro cuerpo.

**Periodo orbital:** tiempo que tarda un cuerpo celeste (planeta, luna o satélite) en completar una órbita alrededor de otro cuerpo.

**Principio de mínima acción:** la naturaleza actúa de forma que su evolución se presenta a través del camino que minimiza a la acción (la integral temporal del lagrangiano).

**Producto cruz:** es una operación entre dos vectores que resulta en un nuevo vector, esta es de forma perpendicular al plano formado por los dos vectores iniciales.

**Programación genética:** es una técnica de aprendizaje automático, se basa en principios de evolución biológica para resolver problemas.

**Punto de inflexión:** es un punto en donde los valores de una función continua cambian de concavidad.

**Radianes:** es una unidad de medida angular. Un radián equivale aproximadamente a 57.3 grados.

**Radio:** segmento de línea que une el centro de una circunferencia con un punto respecto a su borde.

**Referencia inercial:** es un sistema que no experimenta aceleración. Es un marco de referencia en reposo o que se mueve a velocidad constante.

**Regresión:** modela la relación entre una variable dependiente y una variable independiente.

**Regresión simbólica:** es una técnica de aprendizaje automático que busca ecuaciones matemáticas que describan un conjunto de datos, sin necesidad de asumir una forma funcional de manera previa.

**Residuos del ajuste:** son la diferencia entre los valores observados y valores predichos, también llamado errores.

**Revoluciones:** representa una vuelta completa de 360 grados. Semieje: cada una de las dos mitades de un eje.

**Simplificación:** es el proceso de reducir expresiones algebraicas a su forma más compacta.

**Sistemas complejos:** son difíciles de predecir y no lineales, generalmente implica resolverlos con métodos numéricos.

**Semieje mayor y menor:** el semieje mayor de una elipse es la distancia desde el centro hasta un extremo del eje mayor. El semieje menor es la distancia desde el centro hasta un extremo del eje menor.

**Teorema:** es una proposición matemática demostrable a partir de otros teoremas o axiomas.

**Tracker:** herramienta de análisis y modelado de videos con el uso de frames. Es utilizada para la enseñanza de la física.

**Vectores:** ente matemático representado por un segmento de recta, caracterizado por su módulo, dirección y sentido.

**Vértice:** indica la parte superior o punto más alto de algo.

Se presenta un estudio experimental de la danza tradicional Palo Volador; se recolectaron datos en tres ubicaciones de Guatemala. El objetivo de este trabajo es comparar datos experimentales obtenidos de la réplica del Palo Volador impresa en 3D con las dimensiones de un artículo de referencia, el Palo Volador en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá con la simulación de un modelo teórico, utilizando ajustes de regresión y un método de aprendizaje automático llamado regresión simbólica. Además, se busca encontrar si se puede establecer una analogía entre la primera y segunda ley de Kepler, analizando tres revoluciones del Palo Volador en Chichicastenango, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá.

Se diseñó una estrategia innovadora de adquisición de datos experimentales mediante equipo profesional; drones y cámaras, permitiendo el análisis del movimiento de un bailarín en diferentes ángulos. Hasta donde se tiene conocimiento, esta es la primera vez que se registran, recolectan y analizan datos de los Palos Voladores en Guatemala, posicionándose como un esfuerzo pionero al integrar datos experimentales. Se realizaron comparaciones en las variables fundamentales:  $l$  (largo de la cuerda),  $r$  (radio),  $z$  (altura),  $\theta$  (ángulo cenital) y  $\varphi$  (ángulo azimutal), demostrando que existen discrepancias y coincidencias con el modelo físico teórico.

An experimental study of the traditional Palo Volador dance is presented; data were collected at three locations in Guatemala. The objective of this work is to compare the experimental data obtained in a 3D-printed replica of the Palo Volador with the dimensions reported in a reference article, the Palo Volador in Joyabaj, Quiché and in San Pedro La Laguna, Sololá with the simulation of a theoretical model, using regression fitting and a machine learning method called symbolic regression. In addition, it seeks to find out if an analogy can be established between Kepler's first and second laws by analyzing three revolutions of the Palo Volador in Chichicastenango, Quiché and in San Pedro La Laguna, Sololá.

An innovative strategy for acquiring experimental data was designed using professional equipment; drones and cameras, allowing the analysis of a dancer's motion from different angles. To our knowledge, this is the first time that Palos Voladores data in Guatemala have been recorded, recollected, and analyzed, positioning this work as a pioneering effort by integrating experimental data. Comparisons were made in the fundamental variables:  $l$  (rope length),  $r$  (radius),  $z$  (height),  $\theta$  (zenith angle) and  $\varphi$  (azimuthal angle), demonstrating that there are discrepancies and coincidences with the theoretical physical model.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción y contexto

---

El Palo Volador es una estructura de aproximadamente 30  $m$  de altura, desde la cual descienden, dando vueltas, un número par de danzantes. A medida que el acto se desarrolla hasta llegar los danzantes al suelo, simboliza el tiempo que vuela y el curso de los años que suceden sin alcanzarse. Este forma, en su conjunto, toda la danza un completo y complejo ritual (Hurtado, 1969).

A pesar de su reconocimiento y veneración, el estudio del Palo Volador, especialmente desde la perspectiva de la física, ha sido limitado. Se propuso recolectar datos de campo del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en San Pedro La Laguna, Sololá con el uso de equipo profesional; drones y cámaras para capturar el movimiento de un bailarín. Asimismo, se construyó una réplica del Palo Volador utilizando impresión en 3D para investigar el movimiento de una esfera, utilizando las medidas del artículo de referencia. Esto se realizó con el fin de comparar datos experimentales con el modelo teórico lagrangiano propuesto en el artículo *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky* cubriendo así el vacío existente en la investigación.

Este trabajo busca no solo comprender la física detrás de esta tradición, sino también investigar una analogía entre la física del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, y en Chichicastenango, Quiché y las leyes de Kepler. Para ello se investigó si la proyección desde el cenit, de los videos de la trayectoria, tiene gráficamente formas elípticas, y si barren áreas iguales en tiempos iguales, mediante el análisis de las gráficas proyectadas en el plano  $xy$ .

Este enfoque interdisciplinario promete no solo revelar aspectos físicos previamente no explorados, sino también enriquecer nuestra comprensión de cómo las prácticas culturales pueden ser analizadas y apreciadas a través de la ciencia.

## 2.1. Objetivo general

- Comparar el modelo teórico presentado en *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky* con datos experimentales obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en San Pedro La Laguna, Sololá y en una réplica del dispositivo experimental descrito en el artículo, utilizando métodos de regresiones para analizar su comportamiento, con el fin de evaluarlo en condiciones reales e identificando similitudes y diferencias.
- Explorar las analogías entre el movimiento de un bailarín del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, y Chichicastenango, Quiché y los movimientos astronómicos.

## 2.2. Objetivos específicos

- Realizar ajustes de regresión en *Python* para las gráficas de las variables  $l$  (largo de la cuerda),  $r$  (radio),  $z$  (altura),  $\theta$  (ángulo cenital) y  $\varphi$  (ángulo azimutal) que se obtuvieron en *Tracker* para un bailarín del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en San Pedro La Laguna, Sololá y para una esfera en la réplica del dispositivo experimental empleado en el artículo de referencia.
- Obtener el diagrama de fase de las variables,  $(l, \theta, \varphi)$  para compararlos con la simulación del modelo presentado en el artículo de referencia, identificando coincidencias y discrepancias.
- Investigar si se puede establecer una analogía entre las gráficas de la órbita del bailarín y las órbitas descritas por la primera y segunda ley de Kepler.

La ceremonia del Palo Volador, reconocida por ser una práctica cultural rica y compleja realizada por grupos étnicos de México y Centroamérica (UNESCO, 2009). En esta ceremonia, los danzantes suben a un palo de 30 m de altura, que cuenta con un bastidor cuadrado, un carrete giratorio y un sistema de cuerdas que permite el giro de los voladores. Estos se lanzan al vacío atados con la cuerda, descendiendo gradualmente siguiendo una trayectoria helicoidal, hasta llegar al suelo.

Existen estudios previos del Palo Volador desde el punto de vista antropológico; sin embargo, su estudio desde la física es escaso. Esta es la primera vez que se analizan datos reales del Palo Volador en Guatemala. La investigación previa realizada por Espíndola y colaboradores en 2019, modeló el Palo Volador como un péndulo esférico con longitud variable usando mecánica lagrangiana. Al comparar datos reales con el modelo teórico se espera aportar una visión más auténtica y real del objeto de estudio. Además, se aporta la primera base de datos del Palo Volador en Guatemala para futuras investigaciones.

Se explora una posible relación entre la dinámica de un bailarín del Palo Volador, la primera y segunda leyes de Kepler. Trabajar desde la física un tema habitualmente estudiado desde la antropología ofrece un enfoque interdisciplinario, dado que permite incorporar las ciencias sociales en la contextualización de este trabajo, proporcionando una perspectiva innovadora.

Se abre una nueva vía para la investigación interdisciplinaria, mejorando así la comprensión de estudios culturales, como el Palo Volador, complementados por la física y ampliando el reconocimiento y apreciación de estas prácticas culturales desde una perspectiva nueva.

## 4.1. Introducción al Palo Volador

El Palo Volador es concebido como una danza o un juego que se encuentra en estados de México y en la república de Guatemala. Este consiste en dos pares de bailarines donde cada uno sube al Palo Volador hasta el bastidor, dos de ellos se quedan arriba y los otros dos se sujetan con las cuerdas en las rodillas, o en la cintura, se lanzan al vacío teniendo una trayectoria helicoidal, donde el diámetro que describe es cada vez mayor. En Guatemala se realiza en Chichicastenango (21 de diciembre), Joyabaj (15 de agosto), Cubulco (26 de julio). En las descripciones encontradas en México se tienen a cuatro danzantes, mientras que en Guatemala se tienen a dos danzantes, en su forma más arcaica solamente actuaban dos individuos. El número de danzantes y los sones que se tocan han variado conforme se va perdiendo la tradición y el sentido religioso de la danza, debido a los organizadores de las ferias (García, 1989).



Figura 4.1: Voladores sujetos por cuerdas que descienden desde el punto más elevado hasta alcanzar el nivel del suelo

(Ceballos, 2023)

Guatemala (Palo Volador)	México (Voladores de Papantla)
Se origina en el Popol Vuh, y está asociado a la historia de los hermanos Junajpu e Ixb'alamke. En el ritual, dos bailarines vestidos de monos se lanzan desde lo alto de un palo, simbolizando la historia de cómo los hermanos mayores Jun B'atz' y Jun Ch'owen fueron transformados en monos (Recinos, 1993).	Está asociado al pueblo Totonaca de Veracruz, invocan a dioses a través de sones: Oluhuicalco, el dios del monte, para que los perdone por el sacrificio que van a hacer al cortar el árbol que utilizarán y antes de escalar el palo, invocan a Cahuimin, el dios del viento.
Se tiene a dos personas para volar el palo, además, otras dos personas se quedan arriba, en el centro del palo.	Se tienen a cuatro personas volando el palo, mientras que una quinta persona se queda arriba en el centro del palo.
Se celebra en festividades, en Chichicastenango, Quiché; Cubulco, Baja Verapaz; y Joyabaj, Quiché	Además de celebrarse en festividades, también es considerado una atracción turística

Tabla 4.1: Cuadro comparativo entre el Palo Volador de Guatemala y los Voladores de Papantla en México

#### 4.1.1. El Palo Volador desde la física

El baile de los Voladores de Papantla es un ritual prehispánico, que consiste en un palo de 30 metros de altura con un dispositivo que lo hace girar, donde cuatro cuerdas se encuentran enredadas, los voladores se suben a la cima del objeto, luego, atan las cuerdas a su cintura, los hombres se arrojan al aire, cayendo en el vacío y el dispositivo giratorio inicia su movimiento a medida que los hombres descienden, teniendo una trayectoria similar a la de una helicoides, con una aceleración que no es la de la fuerza gravitacional (Espíndola et al., 2019).

Todos los voladores deben tener un peso idéntico para generar la misma cantidad de energía cinética. Se entiende que, si se mueven hacia la derecha, descenderán, mientras que si se desplazan hacia la izquierda, no lo harán. Así mismo, la longitud del radio de los voladores se incrementa con su velocidad (Retif, 2013).

#### 4.1.2. Simbolismo del Palo Volador desde la astronomía

Entre las variedades de danzas que se conocen en la actualidad, existe una llamada “El Palo de los Voladores”, conocido por tener una forma ancestral y compleja. Se puede observar que a medida que descienden, el diámetro que describen se hace cada vez mayor (Jaúregui, 2010). Según Hurtado (1969), “a medida que el acto se desarrolla hasta llegar los danzantes al suelo, simboliza el tiempo que vuela y el curso de los años que suceden sin alcanzarse. Forma en su conjunto toda la danza un completo y complejo ritual” (p. 82).

Según Galiner (1989, citado en Jáuregui, 2010) “El palo se ubica exactamente en la intersección de los puntos cardinales, representa, por lo tanto, la ideología del centro, de la unión y de la separación del arriba y abajo, de oposición entre las fuerzas diurnas (solares) y nocturnas (terrestres y lunares)” (p. 396). Asimismo se hace énfasis en el movimiento circular antihorario, se trata de una ceremonia cósmica donde los conceptos de orientación, giro antihorario, constituyen aspectos fundamentales (Jaúregui, 2010).

El Palo Volador también se puede interpretar como el centro del mundo, dado que se coloca en el centro de la plaza el pueblo en donde se celebra, Según Martha Nájera:

En el instante en que plantan el Palo Volador en el centro de la plaza del pueblo, en el centro del cosmos, se apuntala el mundo y una vez más, como en los mitos de origen, se separan los cielos de la tierra. El capitán de la danza, en el momento que levanta los brazos, renueva el axis mundi que está fija en el ombligo de la tierra y se prolonga hasta el cielo; su gesto entonces tiene una significación cosmogónica. [...] con las reverencias hacia las cuatro partes del mundo, se adquiere la soberanía sobre las direcciones del espacio cósmico, con ello se domina el conjunto del espacio temporal y el movimiento del astro solar. (Nájera, 2008, p. 69)

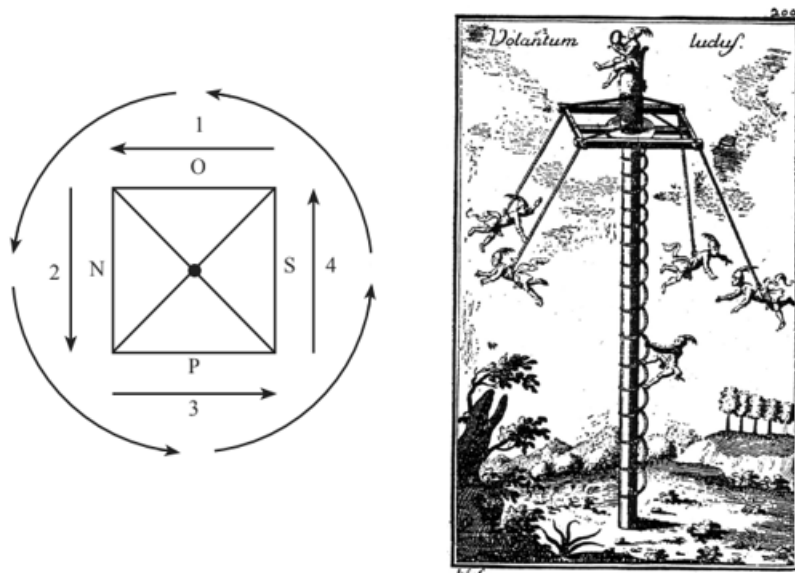


Figura 4.2: Trayectoria antihoraria y relación con los cuatro puntos cardinales

Nota. Tomado de “Una comparación estructural del ritual de volador”, por J. Jáuregui, 2010, Escritos. Revista del Centro de Ciencias del Lenguaje.

Por otro lado, se menciona que la parte simbólica de la danza, radica en que la longitud de la cuerda debe ser tal que al momento de descender se completen 13 vueltas alrededor del palo, que al multiplicarse por el número de danzantes, (en México, por ejemplo son 4) se obtiene el número 52, que es el número del ciclo calendárico totonaca (Comadira, 1996).

En Guatemala se tiene a dos bailarines, en el Popol Vuh se puede encontrar un fragmento en donde se relata cuando Hunbatz y Hunchouén se convierten en monos, castigados por tratar de matar a sus hermanos menores Hunahpú e Ixbalanqué, representado en el Palo Volador como el trinfo entre el bien y el mal.

Se dirigían al pie del árbol llamado Canté [...], - nuestros pájaros no caen al suelo. Id a bajarlos les dijeron a sus hermanos mayores. -Muy bien, contestaron éstos. Y enseguida subieron al árbol, pero el árbol aumentó de tamaño y su tronco se hinchó. Luego quisieron bajar Hunbatz y Hunchouén, pero ya no pudieron descender de la cima del árbol [...] al instante se convirtieron éstos en colas y ellos tomaron la apariencia de monos. (Recinos, 1993, pp. 66-67)

### 4.1.3. Partes del Palo Volador

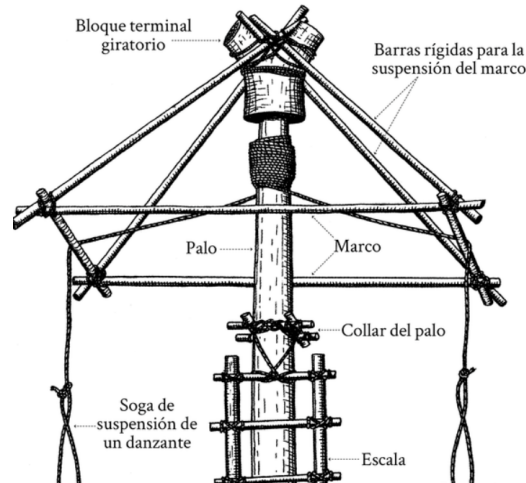


Figura 4.3: Partes del dispositivo giratorio del Palo Volador en Chichicastenango, Quiché, Guatemala  
Nota. Tomado de “La Danza de los Voladores: Patrimonio de la humanidad”, por Vela y Prieto, 2019, Editorial Raíces México.

En la Figura 4.3 se observa un dibujo del dispositivo rotatorio de Chichicastenango, Quiché. El dibujo es de Guy Stresser-Péan. Esta es vital para la Danza del Palo Volador y se encuentra en la parte superior. Su construcción se considera un ingenio pues ha permanecido sin mayores cambios durante siglos. El bloque (también llamado tambor giratorio) se complementa con el marco, permitiendo enredar la cuerda y luego desenredarla con el peso de los bailarines (Vela y Prieto, 2019).

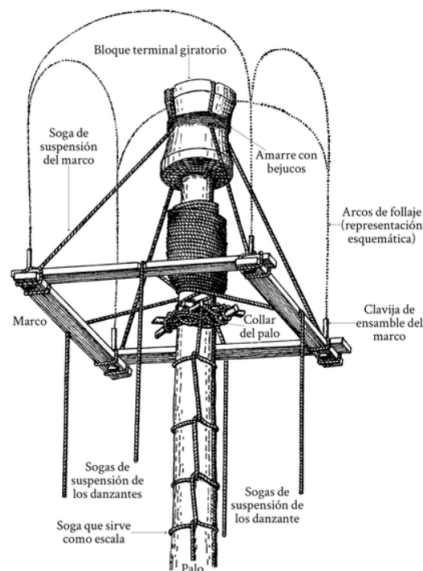


Figura 4.4: Partes del dispositivo giratorio de los Voladores de Papantla en San Luis Potosí, México  
Nota. Tomado de “La Danza de los Voladores: Patrimonio de la humanidad”, por Vela y Prieto, 2019, Editorial Raíces México.

En la Figura 4.4 se observa el dibujo del dispositivo rotatorio de San Luis Potosí, México. El dibujo es de Guy Stresser-Péan (Vela y Prieto, 2019).

Se puede observar que se tienen diferencias entre el dispositivo giratorio de Chichicastenango, Quiché. En Guatemala se usan barras rígidas para la suspensión del marco, sin embargo, en México se utilizan sogas de suspensión las cuales se encuentran sujetadas al bloque terminal giratorio. En la Figura 4.3 se observa que la escalera es de madera, sin embargo, en la Figura 4.4 se observa que se usan sogas como escala.

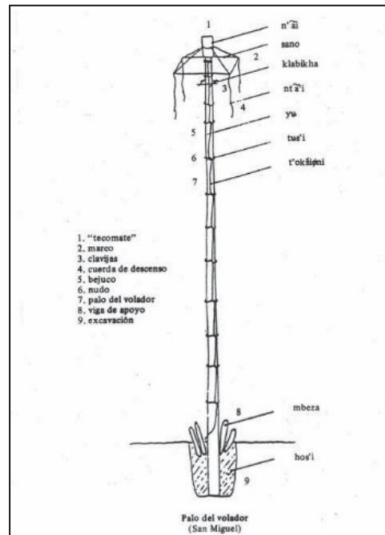


Figura 4.5: Partes del Palo Volador

Nota. Tomado de "Una comparación estructural del ritual de volador", por J. Jaúregui, 2010, Escritos. Revista del Centro de Ciencias del Lenguaje.

1. Tecomate: también llamado bloque terminal giratorio, manzana o carrete giratorio. Se encuentra en la parte superior, encargado de la rotación.
2. Marco: consiste en cuatro maderas resistentes de un metro de largo.
3. Clavijas: Se utilizan para ensamblar el marco y para sujetar la escalera.
4. Cuerda de descenso: los danzantes lo utilizan para lanzarse al vacío y llegar al suelo.
5. Bejuco: usada para amarrar y asegurar partes de la estructura, además es usada como escalera.
6. Nudo: nudos hechos con el bejuco que sirve como escalera.
7. Palo del volador: el tronco del árbol utilizado.
8. Viga de apoyo: asegura y aporta estabilidad al tronco utilizado. Se utilizan estacas de madera.
9. Excavación: es usada para colocar la parte inferior del tronco del árbol y asegurar su estabilidad.

## 4.2. Mecánica lagrangiana

### 4.2.1. Fundamentos de la mecánica lagrangiana

El movimiento de una partícula, dentro de un sistema de referencia inercial, queda descrito mediante las leyes de Newton; sin embargo, cuando se está trabajando con sistemas más complejos es necesario utilizar otros procedimientos que permitan abordar los problemas de forma general; el principio de Hamilton contiene un método de esta índole y las ecuaciones de movimiento que resultan de esta aplicación se llaman ecuaciones de Lagrange.

El principio de Hamilton puede desarrollarse de la siguiente forma, de todas las trayectorias existentes, que puede seguir un sistema dinámico para desplazarse de un punto a otro en un intervalo de tiempo, la trayectoria seguida es la que hace mínima la integral temporal de la diferencia entre la energía cinética y energía potencial (Thornton y Marion, 2004).

### 4.2.2. Espacio de fase

Las coordenadas generalizadas pueden utilizarse para definir un espacio de configuraciones de  $n$  grados de libertad, un punto en este espacio solo especifica la posición de cada una de las partículas, no logrando deducirse nada del movimiento de las partículas.

El diagrama de fase permite representar el conjunto de posiciones, para sus respectivos momentos, es decir, cada punto representan el estado del sistema físico, este estado está caracterizado por la posición de cada una de las partículas y sus respectivos momentos, asimismo el espacio de fase permite un análisis completo y detallado de sistemas complejos, mostrando los estados a lo largo del tiempo (Thornton y Marion, 2004).

### 4.2.3. Ecuaciones de Euler-Lagrange

Se define el Lagrangiano como un funcional que representa la diferencia entre la energía cinética y energía potencial.

$$L = T - U \tag{4.1}$$

Para obtener las ecuaciones de Lagrange, se utiliza el principio de mínima acción, o bien, el principio de Hamilton. Las ecuaciones de Euler-Lagrange se expresan matemáticamente como:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \tag{4.2}$$

Donde  $q_i$  son las coordenadas generalizadas, que representan las variables necesarias para describir el estado del sistema. Además,  $\dot{q}_i$ , son las velocidades generalizadas, es decir, las derivadas temporales de las coordenadas generalizadas (Morín, 2007).

## 4.3. Leyes de Kepler

Las leyes de Kepler son leyes astronómicas verificadas por Johannes Kepler en 1609 para la primera y la segunda ley. La tercera ley fue verificada en 1619.

- La primera ley dice que las órbitas de los planetas son elipses con el Sol en uno de sus focos.
- La segunda ley de Kepler plantea que la línea que une el Sol y un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.
- La tercera ley, menciona que el cuadrado del período orbital de un planeta es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.

Para fines de este trabajo, se hará énfasis en la primera y segunda ley de Kepler.

La segunda ley de Kepler es la más simple de derivar y establece que el momento angular de una partícula que se mueve bajo una fuerza central, como la gravedad, es constante, mientras que la primera ley menciona las órbitas elípticas (MIT, 2014).

### 4.3.1. Péndulo esférico como analogía a la segunda ley de Kepler

Para realizar una analogía con un péndulo y la segunda ley de Kepler, se utilizó un cilindro de  $3.5 \pm 0.01$  kg, y se colocó el teléfono en el suelo para seguir el movimiento del péndulo, se midió la posición  $x$  y  $y$  la velocidad durante una revolución elíptica del péndulo. Luego se definen cuatro posiciones y cuatro vectores en la gráfica obtenida (Canassa et al., 2019).



Figura 4.6: Sistema del péndulo esférico como una analogía a la segunda ley de Kepler  
Nota. Tomado de “Spherical Pendulum as analogy to Kepler’s second law”, por Canassa et al., 2019, Physics Education.

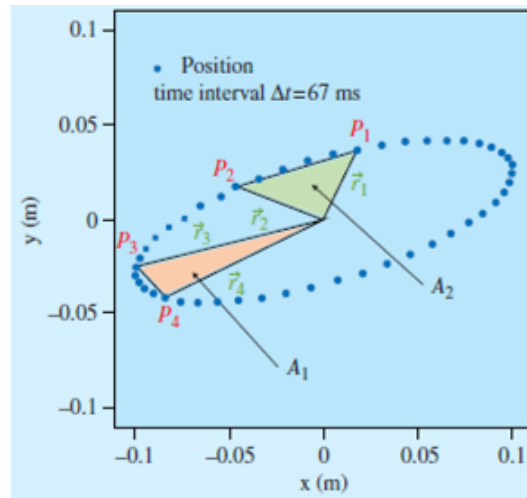


Figura 4.7: Gráfica de un péndulo esférico, mostrando los puntos, vectores y áreas  
 Nota. Tomado de “Spherical Pendulum as analogy to Kepler’s second law”, por Canassa et al., 2019, Physics Education.

El área de los triángulos se puede obtener con el producto cruz de los vectores  $r$ , donde en efecto, se demostró que ambos son bastante similares, demostrando de esta forma, que un péndulo esférico es una buena analogía a la segunda ley de Kepler (Canassa, Freitas, Ferreira, y Goncalves, 2019). Se tomaron estos resultados como base para aplicarlo al Palo Volador, teniendo en cuenta que se está trabajando con un objeto de trayectoria helicoidal.

## 4.4. Ajustes de regresión y regresión simbólica

Para el ajuste de los datos experimentales se utilizó la librería `SciPy`, específicamente la función `curve_fit`. El propósito del ajuste de curvas es analizar un conjunto de datos y estimar los parámetros óptimos de una función dada.

El valor de los parámetros optimizados se encuentra después de minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores experimentales y los valores predichos por el modelo.

Regresión simbólica es una técnica que busca de manera automática una expresión matemática optimizada que describa un conjunto de datos. Esta técnica de aprendizaje automático explora posibles expresiones combinando funciones algebraicas, operadores matemáticos y constantes (Cranmer, 2023). A diferencia del ajuste tradicional como en `curve_fit` donde se requiere una funcional dada, regresión simbólica no requiere una especificación *a priori*.

En este trabajo, se utilizó la librería `PySR` para regresión simbólica únicamente como herramienta complementaria para proponer formas funcionales para luego utilizar ajustes por mínimos cuadrados con la función `curve_fit`. Lo que hace internamente regresión simbólica se observa en las figuras siguientes.

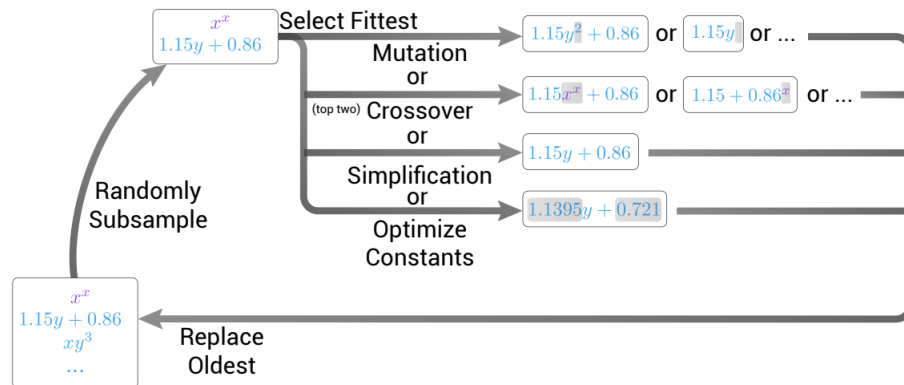


Figura 4.8: Bucle interno de PySR

Nota. Tomado de "Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression", por Cranmer, 2023, arXiv:2305.01582v3.

Regresión simbólica tiene sus bases en la programación genética. En la Figura 4.8 se observa como se toma aleatoriamente una submuestra de una población de expresiones. Se selecciona el más apto. Es tomado ya sea para mutación, cruce, simplificación u optimización.

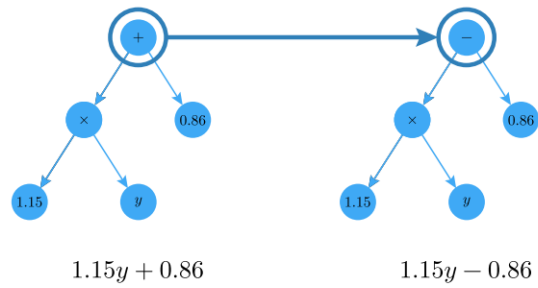


Figura 4.9: Ejemplo de la operación de mutación aplicada a un árbol de expresión  
 Nota. Tomado de “Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression”, por Cranmer, 2023, arXiv:2305.01582v3.

Se puede observar en la Figura 4.9 que el signo  $+$  cambia por el signo  $-$ , de esta forma se tiene un ejemplo de la mutación.

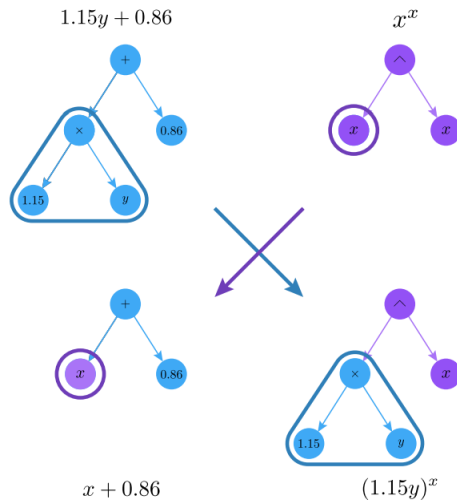


Figura 4.10: Ejemplo de la operación de cruce aplicada a dos árboles de expresiones  
 Nota. Tomado de “Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression”, por Cranmer, 2023, arXiv:2305.01582v3.

En la Figura 4.11 se observan dos árboles de expresiones, cada expresión funciona hasta cierto punto. Se toman subárboles de cada árbol y posteriormente son intercambiados. De esta forma se observa si los hijos funcionan mejor.

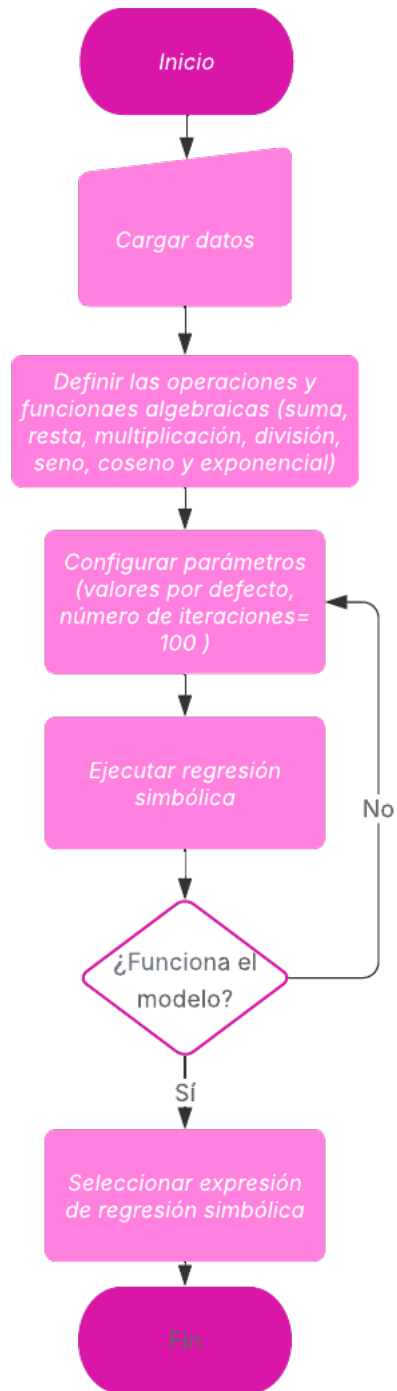


Figura 4.11: Regresión simbólica (vista del usuario)

Regresión simbólica tuvo el fin de encontrar expresiones que se ajusten a los datos obtenidos. Se modificó únicamente el número de iteraciones con 100.

## 4.5. Conceptos matemáticos

**Definición** Sea  $X = (X_n)$  una secuencia de números reales. Se dice que:

$X$  es **creciente** si se satisface la desigualdad

$$x_1 \leq x_2 \leq \cdots \leq x_n \leq x_{n+1} \leq \cdots$$

$X$  es **decreciente** si se satisface la desigualdad

$$x_1 \geq x_2 \geq \cdots \geq x_n \geq x_{n+1} \geq \cdots$$

$X$  es **monótona** si es creciente o decreciente.

**Definición** Sea  $A \subseteq \mathbb{R}$  y sea  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ . Decimos que  $f$  **tiene un máximo absoluto** en  $A$  si hay un punto  $x^* \in A$  tal que

$$f(x^*) \geq f(x) \quad \forall x \in A$$

Decimos que  $f$  **tiene un mínimo absoluto** en  $A$  si hay un punto  $x_* \in A$  tal que

$$f(x_*) \leq f(x) \quad \forall x \in A$$

Decimos que  $x^*$  es un **punto máximo absoluto** de  $f$  en  $A$ , y que  $x_*$  es un **punto mínimo absoluto** de  $f$  en  $A$ , si estos existen.

**Teorema** Sea  $I$  un intervalo abierto y sea  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  con segunda derivada en  $I$ . Entonces  $f$  es una función convexa en  $I$  si y solo si  $f''(x) \geq 0$  para todo  $x \in I$  (Bartle y Sherbert, 2010).

### 5.1. Modelo teórico del artículo: *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky*

Basado en el ritual del Palo Volador, el movimiento de uno de los voladores obedece el comportamiento de un péndulo esférico de longitud variable, dada la naturaleza de este péndulo puede representarse con coordenadas esféricas, donde  $\rho(t)$  es la longitud de la cuerda,  $\theta(t)$  es el ángulo cenital, y  $\varphi(t)$  es el ángulo azimutal. Esto se puede observar en la Figura 5. Por lo tanto, el vector  $r(t)$  viene dado por:

$$r(t) = \rho(t) \sin(\theta(t)) \cos(\varphi(t))\hat{i} + \rho(t) \sin(\theta(t)) \sin(\varphi(t))\hat{j} - \rho(t) \cos(\theta(t))\hat{k} \quad (5.1)$$

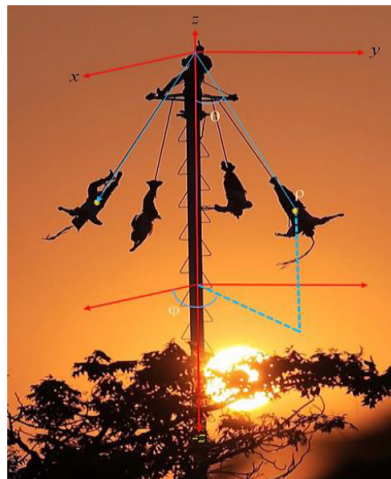


Figura 5.1: Sistema de coordenadas esféricas para un volador

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

$$L = K - U \quad (5.2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (5.3)$$

Se hace la observación de considerar el ángulo cenital constante, y el ángulo cenital variable.

Ángulo cenital constante:

Las ecuaciones de energía cinética y potencial vendrían dadas por:

$$K = \frac{1}{2}m (\dot{\rho}^2 + \dot{\varphi}^2 \rho^2 \sin^2(\theta)) \quad (5.4)$$

$$U = -mg\rho \cos(\theta) \quad (5.5)$$

Y las ecuaciones de movimiento por:

$$\ddot{\rho} = 2\rho\dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + g \cos \theta \quad (5.6)$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{2\dot{\rho}\dot{\varphi}}{\rho} \quad (5.7)$$

Como el lagrangiano no tiene una dependencia explícita sobre  $\varphi$ , significa que alguna propiedad se conserva, siendo esta el momento angular:

$$L_z = m\rho^2 \dot{\varphi} \sin(\theta) \quad (5.8)$$

Ángulo cenital variable:

La energía cinética vendría dada por:

$$K = \frac{1}{2}m \left( \rho^2 \dot{\theta}^2 + \dot{\rho}^2 + \dot{\varphi}^2 \rho^2 \sin^2(\theta) \right) \quad (5.9)$$

Y las ecuaciones de movimiento por:

$$\ddot{\rho} = g \cos(\theta(t)) + \rho \dot{\theta}^2 + \sin^2(\theta) \rho \dot{\varphi}^2 \quad (5.10)$$

$$\ddot{\varphi} = -2 \cot(\theta) \dot{\theta} \dot{\varphi} - \frac{2\dot{\rho}\dot{\varphi}}{\rho} \quad (5.11)$$

$$\ddot{\theta} = \cos(\theta) \sin(\theta) \dot{\varphi}^2 - \frac{g \sin(\theta)}{\rho} - \frac{2\dot{\rho}\dot{\theta}}{\rho} \quad (5.12)$$

(Espíndola et al., 2019).

Para este trabajo de grado, se toman en cuenta los diagramas de fase descritos por el ángulo cenital variable del modelo teórico.

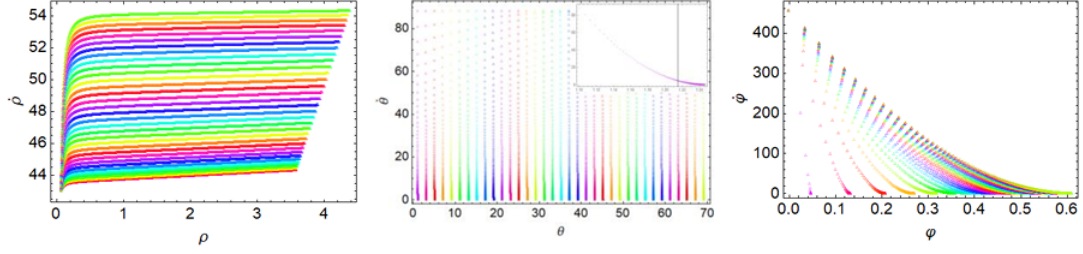


Figura 5.2: Se muestra el diagrama de fase de la longitud, ángulo cenital y ángulo azimutal respectivamente

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

Además, en el artículo se presenta un modelo similar al de Voladores de Papantla. Las partes del dispositivo experimental se presentan en la Figura 5.3.

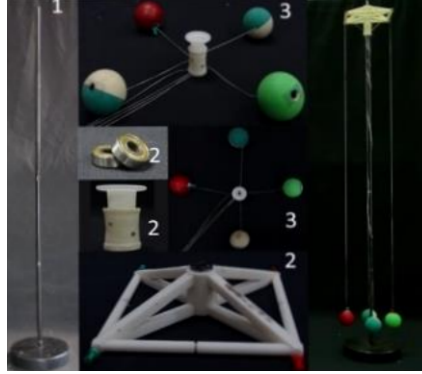


Figura 5.3: Diferentes partes del dispositivo experimental

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

Tabla 5.1: Materiales y dimensiones del dispositivo experimental del artículo de referencia

N. <sup>o</sup>	Categoría	Material	Medidas $\pm 0.01$ m
1	Pedestal	Base	(0.20 – 0.50) m
		Mástil	(1.80 – 2.10) m
2	Dispositivo	Base rotatoria	(0.13 – 0.17) m
		1 polea	(0.03 – 0.05) m
		2 rodamientos	(0.05 – 0.06) m
3	Elementos auxiliares	4 esferas	(0.05 – 0.06) m
		Cuerda	(1.75 – 2.05) m

Nota. Adaptado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

## 6.1. Recolección de datos del Palo Volador

Para lograr hacer la comparación del modelo teórico Lagrangiano presentado en las ecuaciones 5.10, 5.11 y 5.12 se tomaron datos en Joyabaj, Quiché, en su fiesta patronal celebrada el 15 de agosto del 2024, dado que este acto está sujeto a tradiciones locales el número de datos depende de la cantidad de veces que se vuela el Palo Volador.

Materiales y equipo:

1. Drones DJI Mavic Pro 2 y DJI mini 2.
2. Cámara profesional Canon Rebel T5i.
3. Cinta métrica.

Para recolectar videos desde diferentes puntos se utilizó un dron. Primero se colocó el dron en la parte del cenit, tratando de colocarse a 1 -2 metros de distancia del Palo Volador como en la Figura 6.1.

Luego, se colocó el dron en uno de los laterales del Palo Volador tratando de grabarse la mayor parte del recorrido como en la Figura 6.2. Además, se tomaron otros datos en la parte lateral, pero utilizando una cámara profesional.

1. Primero se midió con una cinta un escalón de la escalera utilizada; para calibrar los videos en Tracker para el video lateral.
2. Para la parte cenital, se midió el radio de la circunferencia que se observa en la Figura 6.1 para su calibración.
3. Se tienen 5 videos para la parte del cenit, 1 video para la parte lateral con el dron y 3 videos para la parte lateral con la cámara.

Asimismo, se tomaron datos en San Pedro La Laguna, Sololá, en su fiesta patronal celebrada el 29 de junio del 2025. La danza del Palo Volador en dicho sitio fue retomada después de 80 años de ausencia. El acto fue realizado en un terreno ceremonial conocido como Tza'm Kaqjaay, que en idioma maya Tz'utujil significa "Donde la casa roja" el sitio fue designado como un espacio sagrado para hacer peticiones al corazón del cielo y al corazón de la tierra (Quan, 2025).

La recolección de datos es similar al Palo Volador de Joyabaj, Quiché. Primero se colocó el dron en la parte del cenit, tratando de colocarse a 1 -2 metros de distancia del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá como en la Figura 6.3. Luego, se colocó el dron en uno de los laterales del Palo Volador tratando de grabarse la mayor parte del recorrido como en la Figura 6.4.

1. Primero se midió con una cinta un escalón de la escalera utilizada; para calibrar los videos en Tracker para el video lateral.
2. Para la parte cenital, se utilizó el promedio del diámetro de la cabeza humana como referencia con fines de calibración.
3. Se tienen 2 videos para la parte del cenit, y 1 video para la parte lateral con el dron.

Para investigar si se puede establecer una analogía entre las gráficas de la órbita del bailarín y las leyes de Kepler se utilizaron los videos de la parte del cenit de Joyabaj, Quiché. Además, se tomó otro video en Chichicastenango, Quiché, para la parte del cenit como en la Figura 6.5

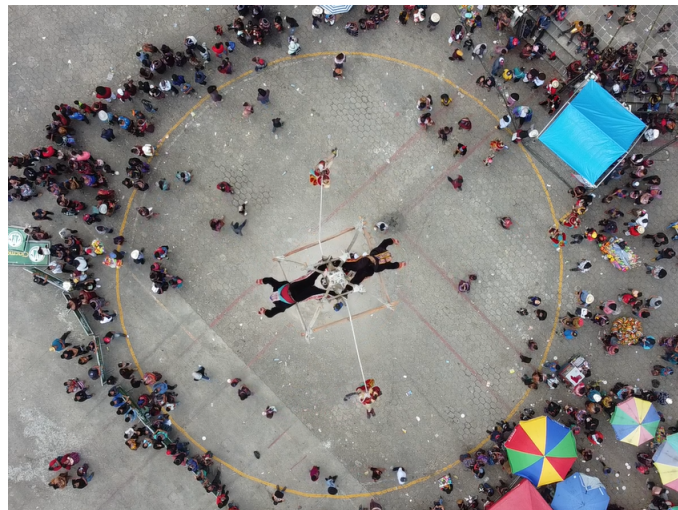


Figura 6.1: Vista desde el cenit capturada por un dron, desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

(Elaboración propia, 2024)



Figura 6.2: Imagen capturada con el dron, desde la parte lateral al Palo Volador en Joyabaj, Quiché  
(Elaboración propia, 2024)



Figura 6.3: Vista desde el cenit capturada por un dron, desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá  
(Elaboración propia, 2025)



Figura 6.4: Imagen capturada con el dron, desde la parte lateral al Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

(Elaboración propia, 2025)



Figura 6.5: Vista Cenital capturada por un dron desde el vértice superior de la estructura del Palo Volador en Chichicastenango, Quiché

(Ceballos, 2023)

### 6.1.1. Ubicaciones de los tres Palos Voladores

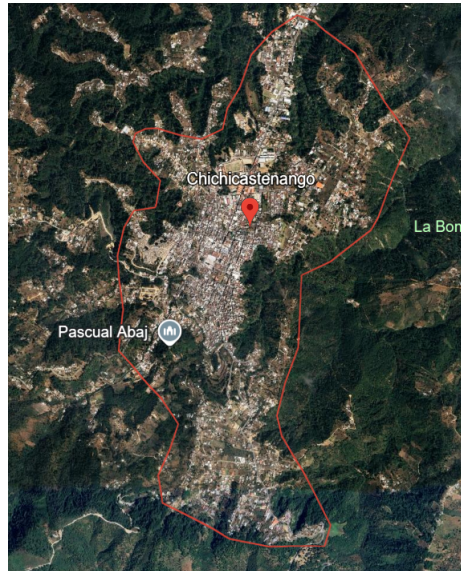


Figura 6.6: Santo Tomás Chichicastenango, Quiché, Guatemala

La primera toma de datos fue en Santo Tomás Chichicastenango, Quiché en diciembre del 2023.

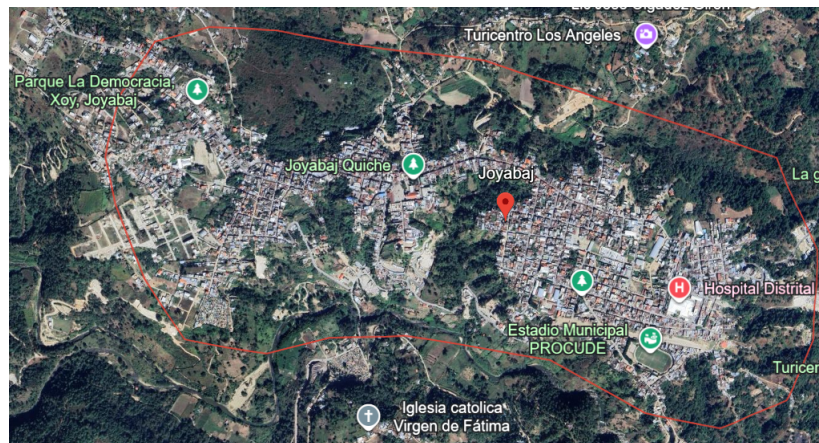


Figura 6.7: Santa María Joyabaj, Quiché, Guatemala

La segunda toma de datos fue en Santa María Joyabaj, Quiché en agosto del 2024.

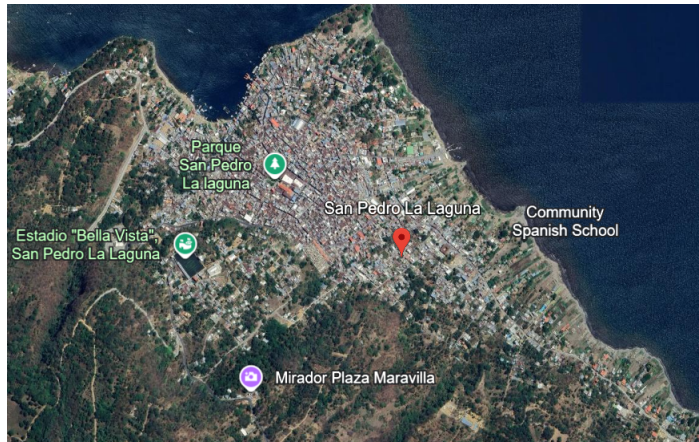


Figura 6.8: San Pedro La Laguna, Sololá, Guatemala

La tercera toma de datos fue en San Pedro La Laguna, Sololá en junio del 2025.

Nótese que para la comparación entre el modelo teórico, la réplica del dispositivo experimental y los Palos Voladores, se utilizó únicamente dos ubicaciones, en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna. No se utilizaron los datos de Chichicastenango, Quiché dado que el dron se alejó cuando estaba en la parte lateral.

Ver el diagrama de flujo para la evaluación de calidad de los videos.

Para la verificación de las leyes de Kepler se utilizaron los datos de Chichicastenango, Quiché y Joyabaj, Quiché. No se incluyeron los datos de San Pedro La Laguna, Sololá debido a limitaciones de tiempo.

En anexos se incluye la información sobre los municipios, y a la vez se encuentra un mapa general en donde aparecen las tres comunidades.

### 6.1.2. Diagrama de flujo de la metodología usada en los Palos Voladores

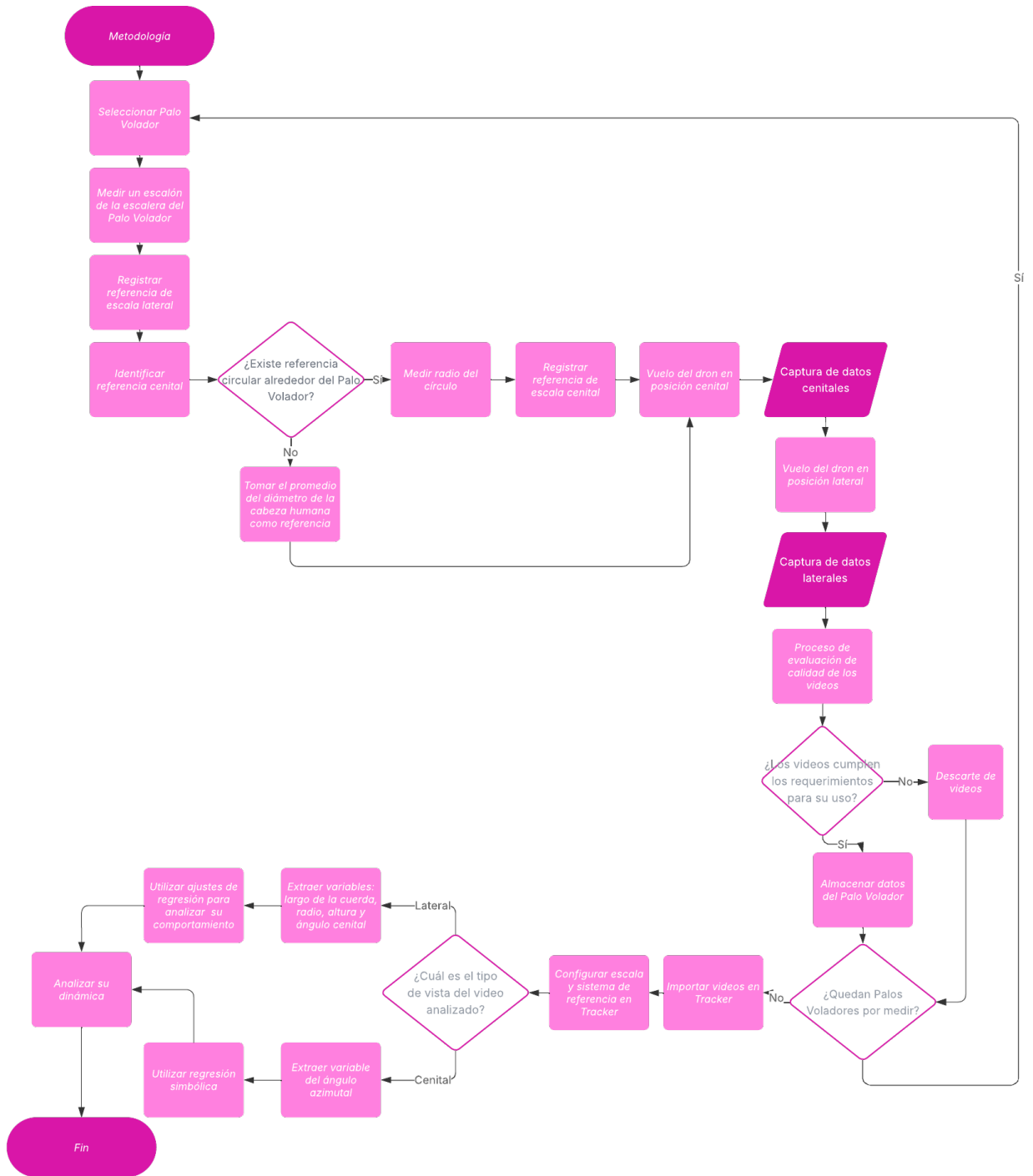


Figura 6.9: Diagrama de flujo de la recolección y procesamiento de datos de los Palos Voladores

Nótese que el dron debe mantener una posición fija, sin desplazamientos durante la captura del video

## 6.2. Construcción de la réplica del dispositivo experimental del artículo *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky*

La construcción de la réplica se hizo con el propósito de presentar los datos experimentales de la misma, dado que el artículo original no se publicaron datos experimentales adicionales a las variables estudiadas, cubriendo así el vacío presentado en el estudio previo. Además, se contaba con pocos datos recolectados en los Palos Voladores.

Se utilizó impresión en 3D para el dispositivo giratorio como en la Figura 6.11 y para las cuatro esferas como en la Figura 6.10

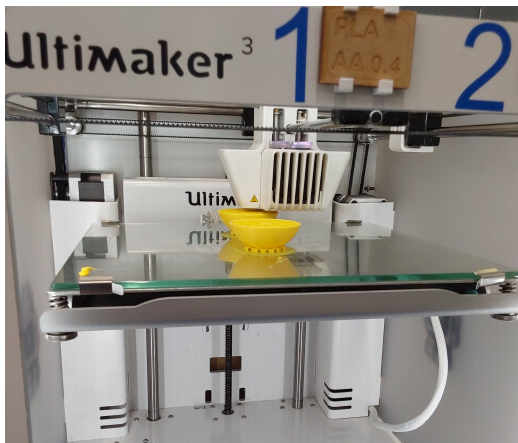


Figura 6.10: Impresión en 3D de una de las esferas para el dispositivo experimental  
(Elaboración propia, 2025)

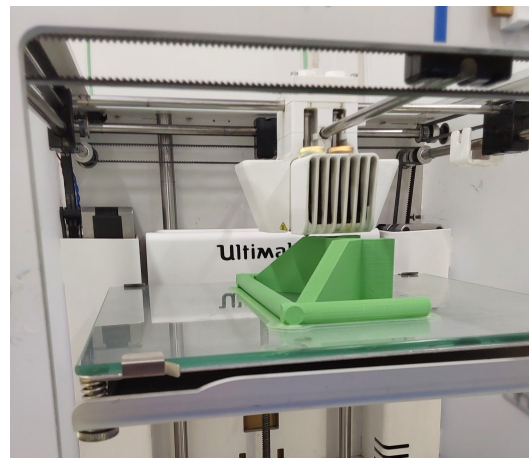


Figura 6.11: Impresión en 3D para la parte rotatoria  
(Elaboración propia, 2025)

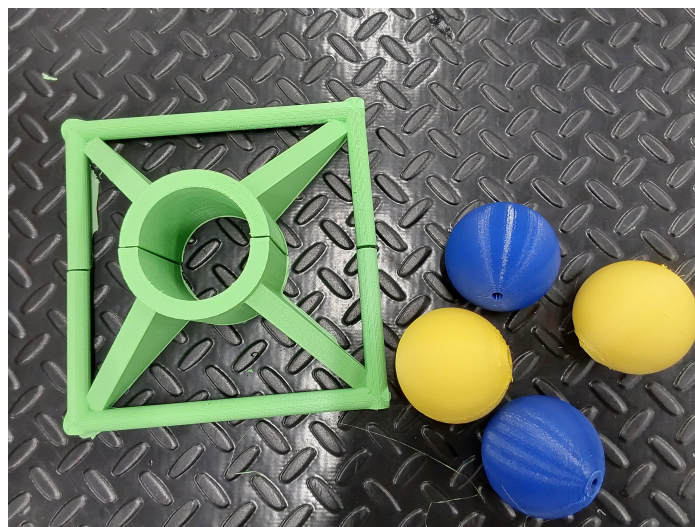


Figura 6.12: Piezas impresas en 3D  
(Elaboración propia, 2025)

Para su construcción se utilizó el siguiente material y equipo:

1. Celular Samsung A16 y Tablet Samsung S6.
2. Dos Cojinetes 17 mm x 40 mm x 12 mm.
3. Plastilina epóxica moldeable.
4. Pegamento epóxico JB weld.
5. Hilo
6. Cinta métrica.
7. Lubricante de silicón, WD-40 Specialist.
8. Base y mástil de madera.
9. Cilindro de enrollamiento impreso en 3D.
10. Base rotatoria impresa en 3D.
11. Cuatro esferas impresas en 3D.

Primero se tuvo la base y el mástil de  $1.85\text{ m} \pm 0.01\text{ m}$  de altura, luego se coloca el cilindro de enrollamiento encima del mástil. El cilindro cuenta con cuatro agujeros por los que pasan cuatro hilos para después enrollarlos encima del cilindro. Se pegó la base rotatoria con pegamento epóxico dado que esta fue impresa en dos partes; los cojinetes fueron pegados en la parte superior e inferior de la parte rotatoria con plastilina epóxica (nótese que fue necesario utilizar lubricante de silicón en los cojinetes para reducir la fricción y evitar un giro lento), después de secarse, se colocó la base rotatoria arriba del cilindro de enrollamiento a aproximadamente a 1.00 cm de distancia para evitar fricción al momento de girar. Los hilos reposan encima de la base rotatoria, en el otro extremo del hilo se encuentran las cuatro esferas, como en la Figura 6.13



Figura 6.13: Réplica del dispositivo experimental  
(Elaboración propia, 2025)

### 6.3. Toma de datos de la réplica del dispositivo experimental

Para recolectar los videos desde diferentes puntos se utilizaron dos cámaras de celulares: la primera se colocó desde el cenit como en la Figura 6.14 y el segundo celular se colocó en la parte lateral como en la Figura 6.15.

1. Primero se midió con una cinta el mástil, para calibrar los videos en *tracker* del video lateral
2. Para la parte cenital, se midió el borde de una de las cartulinas en el suelo.
3. Se tuvieron 30 videos para la parte del cenit y 30 videos para la parte lateral.

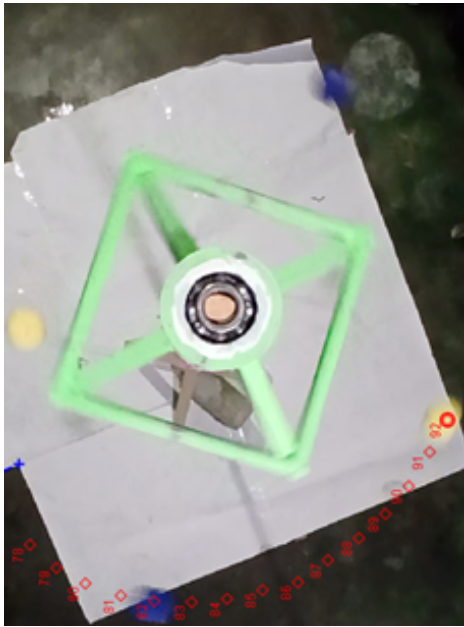


Figura 6.14: Réplica del Palo Volador visto desde el cenit  
(Elaboración propia, 2025)

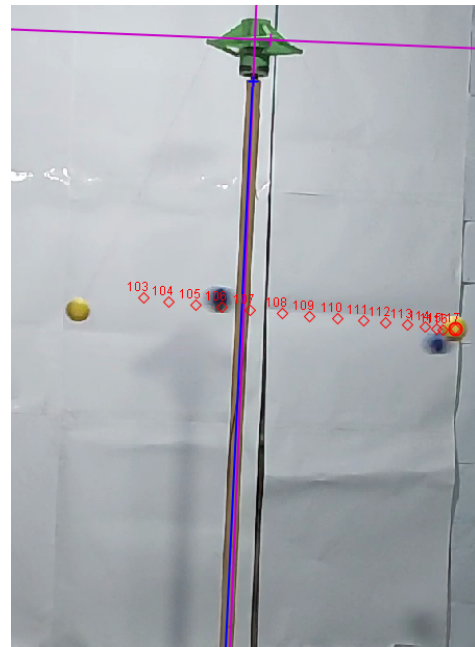


Figura 6.15: Réplica del Palo Volador desde la parte lateral  
(Elaboración propia, 2025)

## 6.4. Procesamiento de datos

Los datos desde el cenit son para obtener las gráficas del ángulo azimutal. El lado lateral es para: el largo de la cuerda, el radio, la altura y el ángulo cenital. Nótese que tanto para el Palo Volador como para la réplica del dispositivo experimental únicamente se toman los datos cuando la esfera/bailarín se encuentran en los puntos laterales indicados en la Figura 6.16, porque los puntos del centro no se pueden obtener la información requerida. Los datos brutos de los 30 videos pueden consultarse en el enlace que se encuentra en anexo A.

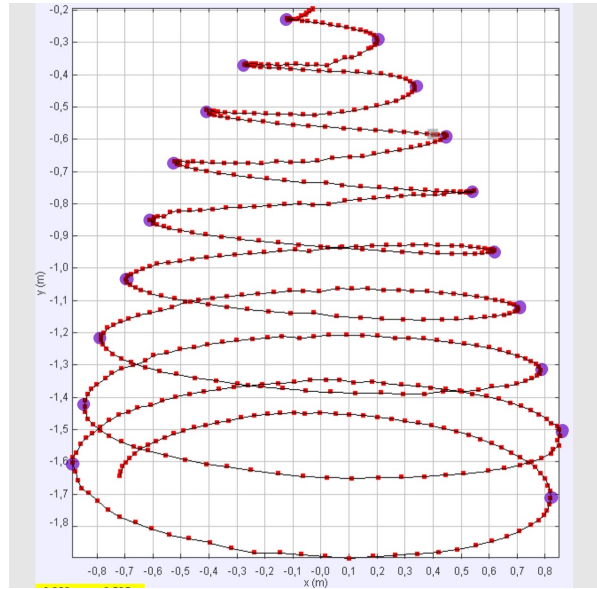


Figura 6.16: Trayectoria del dispositivo experimental en *tracker*  
(Elaboración propia, 2025)

Al tener los puntos mencionados se utilizaron diferentes ajustes en *Python* mediante la función `curve_fit` del paquete *SciPy*, la función permite obtener los parámetros del modelo mediante métodos de mínimos cuadrados no lineales, lo cual se empleó como métrica para obtener las velocidades y diagramas de fase, sin embargo, esto no significa que el ajuste encontrado sea físicamente consistente con la regresión usada, pues se utilizó como medio de comparación con el modelo teórico.

Para el análisis de los datos desde el cenit se utilizó regresión simbólica, una técnica de aprendizaje automático que permite encontrar una ecuación que se ajuste a los datos sin necesidad de especificar una función inicial como lo requiere `curve_fit`, se recalca que la ecuación encontrada no necesariamente significa que sea físicamente consistente con la regresión encontrada. Los ajustes se utilizaron en una región específica. Los resultados se encuentran en la siguiente sección.

### 7.1. Comparación de datos reales con el modelo teórico del artículo de referencia

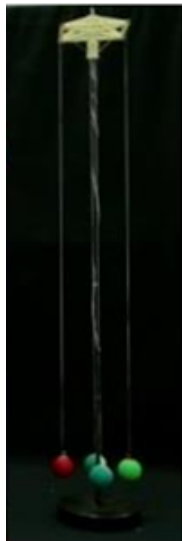


Figura 7.1: Dispositivo experimental del artículo

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.



Figura 7.2: Réplica del dispositivo experimental

(Elaboración propia, 2025)



Figura 7.3: Palo Volador en Joyabaj, Quiché  
(Elaboración propia, 2024)



Figura 7.4: Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá  
(Elaboración propia, 2025)

.	Dispositivo Experimental del artículo	Réplica del dispositivo experimental	Palo Volador en Joyabaj, Quiché	Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá
Mástil	metal	Madera - pino	Madera	Madera - Pino
Base del mástil	metal	Madera - pino	No aplica	No aplica
Esferas/bailarines	No especifica	Impresión en 3D	bailarines	bailarines
Cuerda	No especifica	Hilo de Rayón	Mecate de ixte	Mecate de ixte
Dispositivo giratorio	Impresión en 3D	Impresión en 3D	Madera	Madera

Tabla 7.1: Tabla de comparación de materiales en el dispositivo experimental del artículo de referencia, réplica del dispositivo experimental, el Palo Volador en Joyabaj, Quiché y el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

Datos para la altura

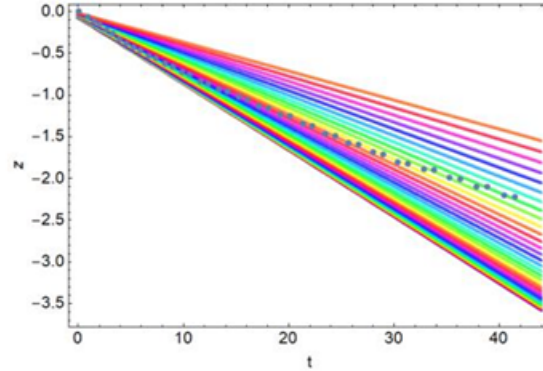


Figura 7.5: Simulación del modelo teórico del artículo. Comparación de la coordenada  $z$  entre la simulación numérica y datos experimentales. Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

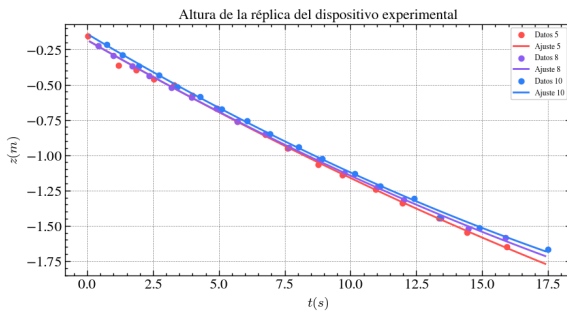


Figura 7.6: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $z$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental

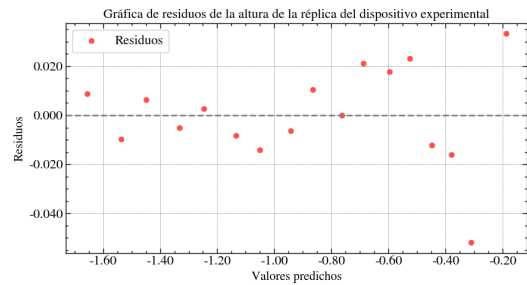


Figura 7.7: Gráfica de residuos de la coordenada  $z$  para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

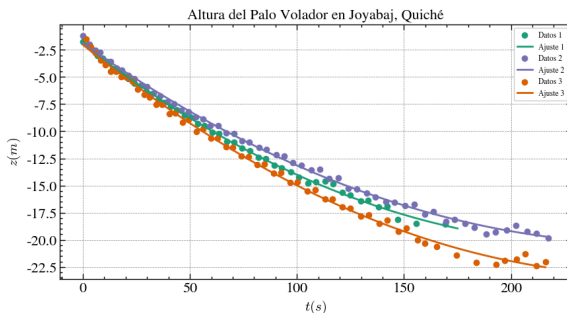


Figura 7.8: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $z$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

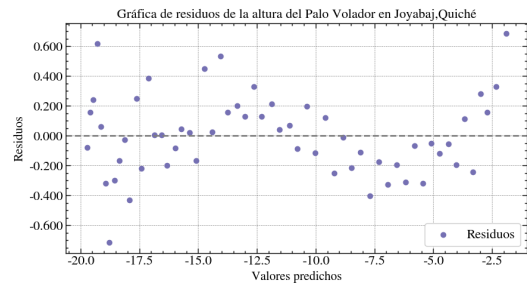


Figura 7.9: Gráfica de residuos de la coordenada  $z$  para el conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

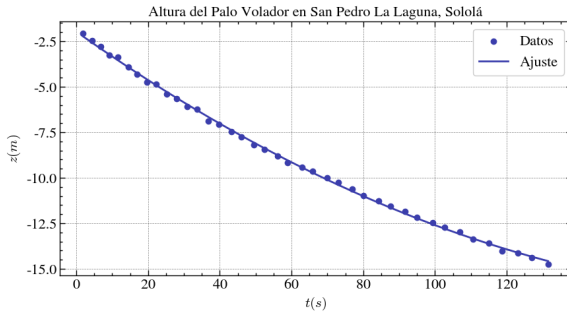


Figura 7.10: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $z$  en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

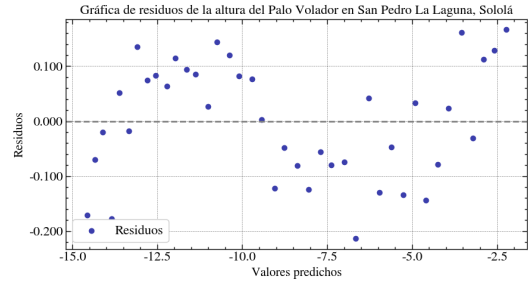


Figura 7.11: Gráfica de residuos de la coordenada  $z$  para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.5 se observa la simulación del modelo teórico, se menciona en el artículo de referencia el uso de métodos numéricos para resolver las ecuaciones acopladas 5.10, 5.11 y 5.12 obtenidas de las ecuaciones de Euler-Lagrange, con el método de Runge-Kutta “Se ejecutaron 35 corridas con las mismas condiciones iniciales” (Espíndola et al., 2019, p. 8)

En la Figura 7.6, se encuentran 3 de los 30 conjuntos de datos de la altura en función del tiempo en la réplica del dispositivo experimental. El comportamiento de los 30 datos es similar, dado que tuvieron un ajuste cuadrático, sin embargo, para simplificar la forma en que se presentan los datos solo se exhiben tres de ellos. Los coeficientes cuadráticos fueron  $8.93 \times 10^{-4}$ ,  $1.09 \times 10^{-3}$ , y  $1.30 \times 10^{-3}$  respectivamente.

En la Figura 7.7 se encuentra la gráfica de residuos del ajuste 5 de la Figura 7.6. Los puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando que se encontró un ajuste adecuado.

En la Figura 7.8, se encuentran 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché para la altura en función del tiempo, se puede observar que tienen el mismo comportamiento dado que las 3 tuvieron un ajuste cuadrático con una duración de 216 s (3.60 minutos). Los coeficientes cuadráticos fueron  $3.10 \times 10^{-4}$ ,  $2.61 \times 10^{-4}$ , y  $2.99 \times 10^{-4}$  respectivamente.

El Palo volador inicia a una altura de 2.00 m aproximadamente. El conjunto de datos 1 termina en los 18.0 m dado que el video no tomó todo el recorrido; el conjunto de datos 2 termina en 20.0 m, mientras que el conjunto de datos 3 logró captar toda la trayectoria con 22.2 m.

En la Figura 7.9 se encuentra el gráfico de residuos del ajuste 2 de la Figura 7.8, estos puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando que se encontró un ajuste adecuado.

En la Figura 7.10, se encuentra la gráfica de la altura en función del tiempo del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá con un coeficiente cuadrático de  $3.32 \times 10^{-4}$ . En la Figura 7.11 se encuentra el gráfico de residuos, estos puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando un ajuste adecuado.

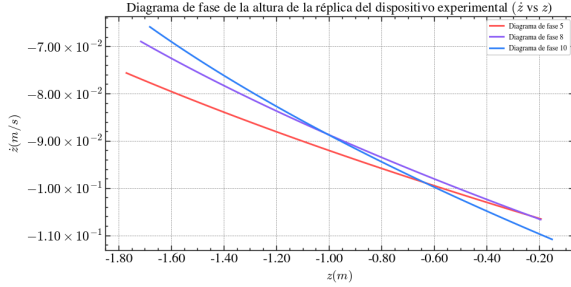


Figura 7.12: Diagrama de fase de la altura obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

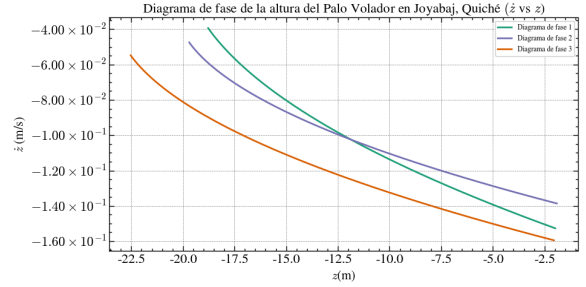


Figura 7.13: Diagrama de fase de la altura obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

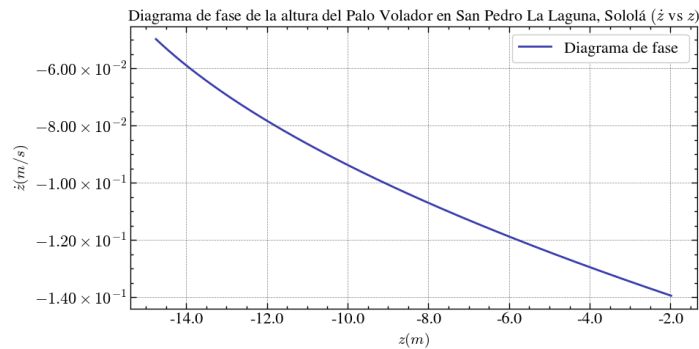


Figura 7.14: Diagrama de fase de la altura obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.12 se presenta 3 de los 30 diagramas de fase de la altura de la réplica del dispositivo experimental, tiene aproximadamente  $1.80m$  de altura y la velocidad decrece a medida en que las esferas descienden.

En la Figura 7.13 se presenta 3 diagramas de fase de la altura del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, tiene aproximadamente  $22.5m$  de altura y la velocidad decrece a medida en que los bailarines descienden.

En la Figura 7.14 se presenta el diagrama de fase de la altura del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá, el conjunto de datos no logró capturar todo el recorrido del bailarín por lo que se observa una altura aproximadamente de  $15m$  de altura, y la velocidad decrece a medida en que los bailarines descienden del mástil.

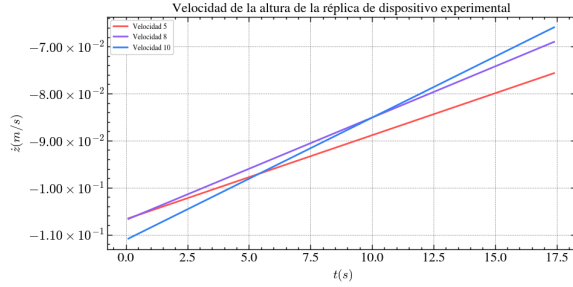


Figura 7.15: Velocidades de la altura en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

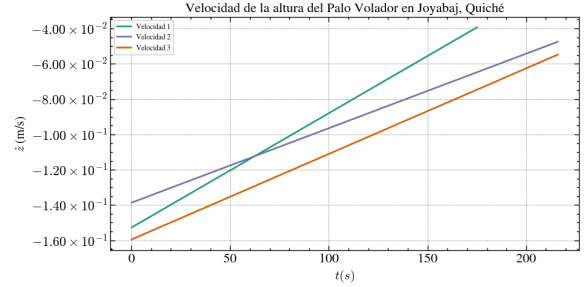


Figura 7.16: Velocidades de la altura en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

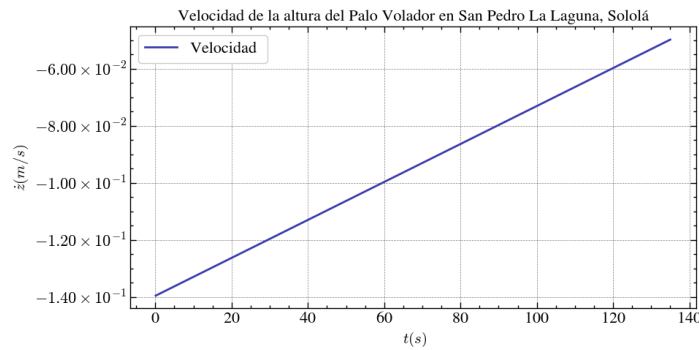


Figura 7.17: Velocidad de la altura en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.15 se observa 3 de las 30 velocidades del conjunto de datos de la altura de la réplica del dispositivo experimental. La velocidad del conjunto de datos 5 empieza alrededor de  $-1.06 \times 10^{-1} m/s$  y termina aproximadamente en  $-7.50 \times 10^{-2} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 8 empieza alrededor de  $-1.06 \times 10^{-1} m/s$  y termina aproximadamente en  $-7.00 \times 10^{-2} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 10 empieza alrededor de  $-1.10 \times 10^{-1} m/s$  y terminan alrededor de  $-6.50 \times 10^{-2} m/s$ .

En la Figura 7.16 se observa 3 velocidades del conjunto de datos de la altura del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad del conjunto de datos 1 empieza aproximadamente con  $-1.55 \times 10^{-1} m/s$  y termina alrededor de  $-4.00 \times 10^{-2} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 2 empieza alrededor de  $-1.40 \times 10^{-1} m/s$  y termina aproximadamente en  $-4.50 \times 10^{-2} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 3 empieza alrededor de  $-1.60 \times 10^{-1} m/s$  y termina alrededor de  $-5.50 \times 10^{-2} m/s$ .

En la Figura 7.17 se encuentra la velocidad de la altura del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá, empieza con una velocidad alrededor de  $-1.40 \times 10^{-1} m/s$  y termina aproximadamente en  $-5.00 \times 10^{-2} m/s$ .

Datos para la longitud de la cuerda

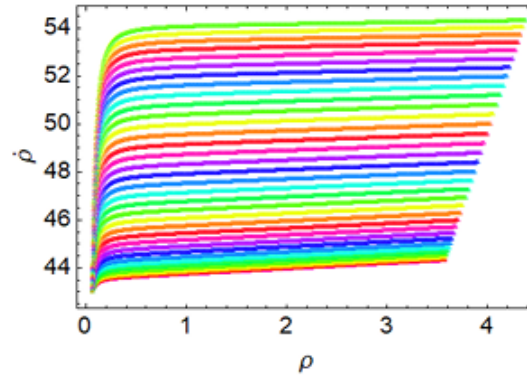


Figura 7.18: Simulación numérica para el diagrama de fase de la coordenada  $\rho$ . Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico

Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

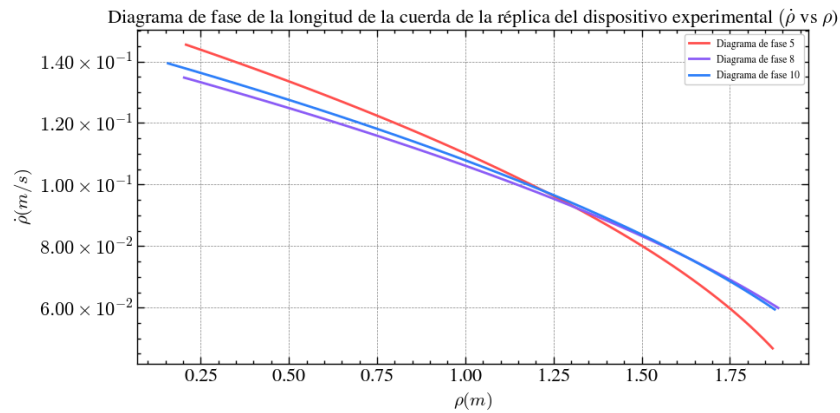


Figura 7.19: Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos del dispositivo experimental

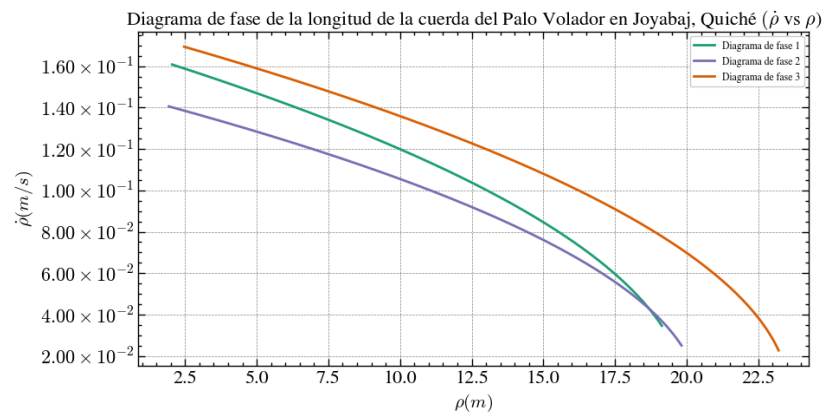


Figura 7.20: Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

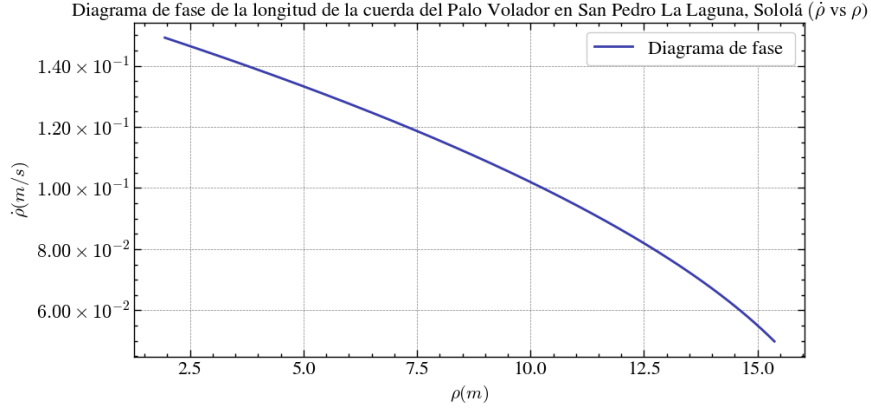


Figura 7.21: Diagrama de fase de la longitud de la cuerda, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.18 observa que, a medida que la longitud de la cuerda incrementa la velocidad también incrementa. El artículo indica que “se tomaron 35 corridas con las mismas condiciones iniciales” (Espíndola et al., 2019, p. 8) en todas las corridas se observa que empieza con una velocidad de  $43 \text{ cm/s}$  ( $0.45 \text{ m/s}$ ) y la última corrida llega hasta una velocidad de  $54 \text{ cm/s}$  ( $0.54 \text{ m/s}$ ).

En la Figura 7.19 se tienen los diagramas de fase de la longitud de la cuerda en la réplica del experimento del artículo de referencia. El comportamiento de los 30 videos es similar, dado que tuvieron un ajuste cuadrático, sin embargo, para simplificar la forma en que se presentan los datos solo se exhiben tres de ellos, la cuerda llega hasta aproximadamente  $1.85 \text{ m}$  y la velocidad decrece a medida en que la esfera desciende del mástil. La velocidad del conjunto de datos 5 comienza alrededor de  $1.45 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad del conjunto de datos 8 comienza alrededor de  $1.35 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , mientras que la velocidad del conjunto de datos 10 empieza con  $1.40 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ . La velocidad del conjunto de datos 5 termina con  $5.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ , mientras que las velocidades del conjunto de datos 8 y 10 terminan alrededor de  $6.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

En la Figura 7.20 se observan tres diagramas de fase de la longitud de la cuerda del Palo Volador en Joyabaj, Quiché; los diagramas de fase 1 y 2 llegan hasta aproximadamente  $20.0 \text{ m}$ , mientras que el diagrama de fase 3 hasta alrededor de  $23.5 \text{ m}$  dado que logró captar todo el trayecto del bailarín, además, la velocidad decrece a medida en que el bailarín desciende del mástil. La velocidad del conjunto de datos 1 comienza alrededor de  $1.60 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad del conjunto de datos 2 comienza alrededor de  $1.40 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , mientras que la velocidad del conjunto de datos 3 con  $1.70 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ . El video 1 termina alrededor de  $4.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ , porque no terminó de capturar todo el recorrido. Las velocidades del conjunto de datos 2 y 3 terminan con una velocidad cercana a  $2.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

En la Figura 7.21 se tiene el diagrama de fase de la longitud de la cuerda del Palo Volador en San Pedro La Laguna, dado que no se logró grabar todo el recorrido del bailarín solo se observa tener  $15.0 \text{ m}$  en la cuerda, además, la velocidad también decrece a medida en que el bailarín desciende del mástil. La velocidad empieza con  $1.50 \times 10^{-1} \text{ m/s}$  y termina con  $5.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

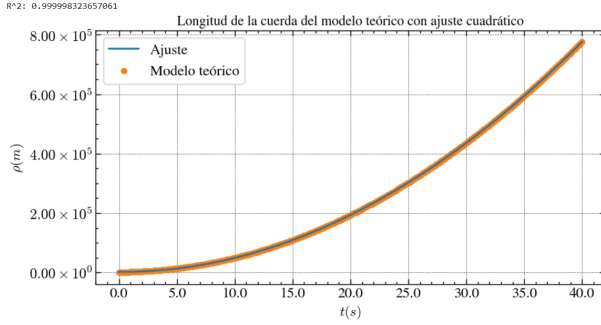


Figura 7.22: Ajuste cuadrático al modelo teórico para la longitud de la cuerda en función del tiempo

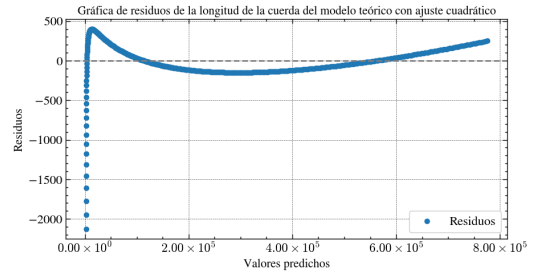


Figura 7.23: Gráfica de residuos del ajuste al modelo teórico para la longitud de la cuerda

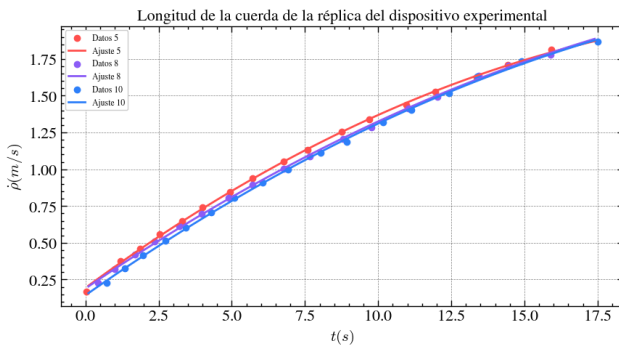


Figura 7.24: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $\rho$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental

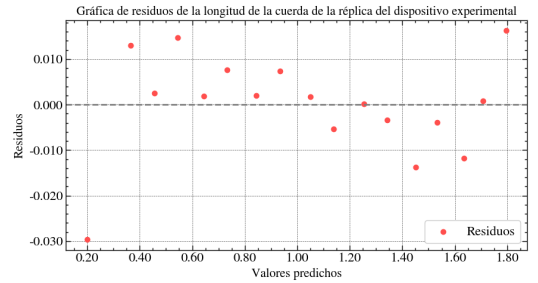


Figura 7.25: Gráfica de residuos de la coordenada  $\rho$  para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

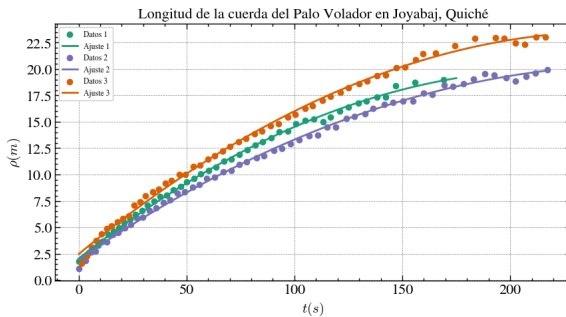


Figura 7.26: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $\rho$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

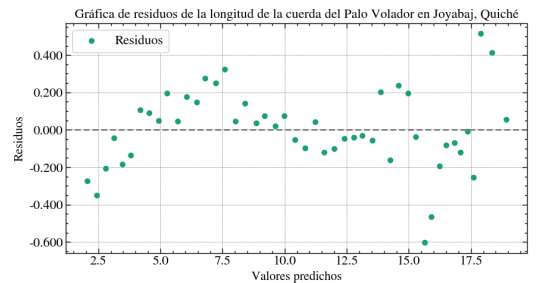


Figura 7.27: Gráfica de residuos de la coordenada  $\rho$  para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

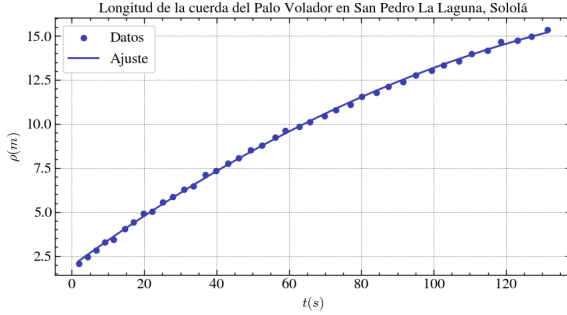


Figura 7.28: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $\rho$  en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

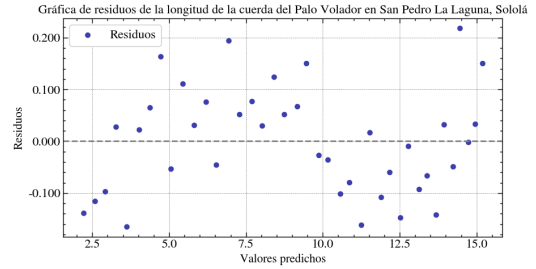


Figura 7.29: Gráfica de residuos de la coordenada  $\rho$  para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.22 se observa la longitud de la cuerda del modelo teórico lagrangiano con las condiciones iniciales del artículo de referencia. Se trató de realizar un ajuste para observar si su comportamiento es cuadrático, sin embargo, aunque  $R^2 = 0.999$  el gráfico de residuos en la Figura 7.23 no sigue un patrón aleatorio alrededor de cero. Este gráfico es cóncava hacia arriba.

En la Figura 7.24 se observa 3 de los 30 conjuntos de datos de la longitud de la cuerda de la réplica del dispositivo experimental. Se puede observar que tienen el mismo comportamiento dado que las 3 tuvieron ajustes cuadráticos; los coeficientes cuadráticos fueron  $-2.85 \times 10^{-3}$ ,  $-2.16 \times 10^{-3}$ , y  $-2.31 \times 10^{-3}$  respectivamente. En la Figura 7.25 se tiene el gráfico de residuos del ajuste 5 de la Figura 7.24; los puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando un ajuste adecuado.

En la Figura 7.26 se observa 3 conjuntos de datos de la longitud de la cuerda del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. Se puede observar que tienen el mismo comportamiento dado que las 3 tuvieron ajustes cuadráticos; los coeficientes cuadráticos fueron  $-3.61 \times 10^{-4}$ ,  $2.67 \times 10^{-4}$ , y  $3.40 \times 10^{-4}$  respectivamente. En la Figura 7.27 se tiene el gráfico de residuos del ajuste 1 de la Figura 7.26; los puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando un ajuste adecuado.

En la Figura 7.28 se encuentra la gráfica de la altura del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá con un ajuste cuadrático, con coeficiente cuadrático de  $-3.68 \times 10^{-4}$ . En la Figura 7.29 se tiene el gráfico de residuos de la Figura 7.28; los puntos se encuentran de manera aleatoria alrededor de cero, indicando un ajuste adecuado

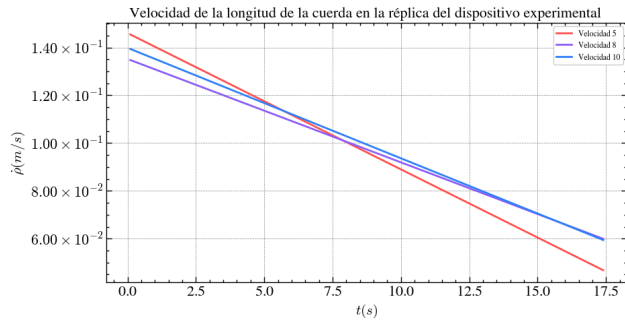


Figura 7.30: Velocidades de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

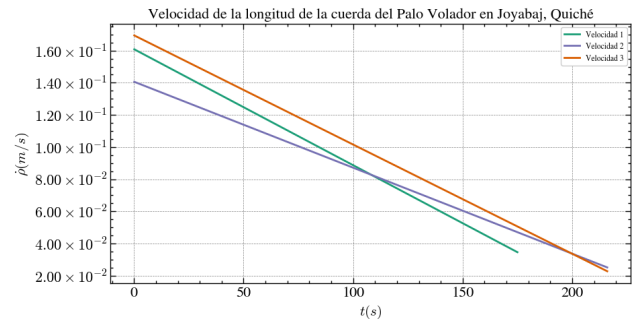


Figura 7.31: Velocidades de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenidas a partir de los ajustes realizados a los 3 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

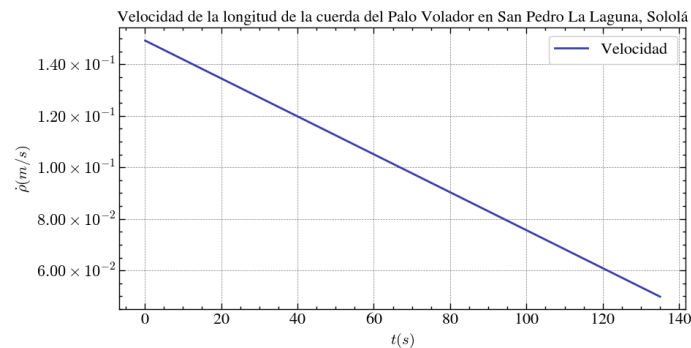


Figura 7.32: Velocidad de la longitud de la cuerda en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.30 se tienen 3 de las 30 velocidades del conjunto de datos de la longitud de la cuerda de la réplica del dispositivo experimental. La velocidad del conjunto de datos 5 comienza alrededor de  $1.45 \times 10^{-1} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 8 comienza alrededor de  $1.35 \times 10^{-1} m/s$ , mientras que la velocidad del conjunto de datos 10 empieza con  $1.40 \times 10^{-1} m/s$ . La velocidad del conjunto de datos 5 termina con  $5.00 \times 10^{-2} m/s$ , mientras que las velocidades del conjunto de datos 8 y 10 terminan alrededor de  $6.00 \times 10^{-2} m/s$ .

En la Figura 7.31 se presentan 3 velocidades del conjunto de datos de la longitud de la cuerda del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad del conjunto de datos 1 comienza alrededor de  $1.60 \times 10^{-1} m/s$ , la velocidad del conjunto de datos 2 comienza alrededor de  $1.40 \times 10^{-1} m/s$ , mientras que la velocidad del conjunto de datos 3 con  $1.70 \times 10^{-1} m/s$ . El video 1 termina alrededor de  $4.00 \times 10^{-2} m/s$ , porque no terminó de capturar todo el recorrido. Las velocidades del conjunto de datos 2 y 3 terminan con una velocidad cercana a  $2.00 \times 10^{-2} m/s$ .

En la Figura 7.32 se tiene la velocidad de la longitud de la cuerda del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La velocidad empieza con  $1.50 \times 10^{-1} m/s$  y termina con  $5.00 \times 10^{-2} m/s$ .

Datos para el ángulo cenital

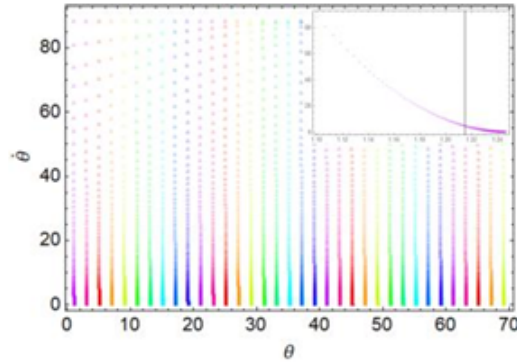


Figura 7.33: Simulación numérica de la coordenada  $\theta$  en función del tiempo en la esquina superior derecha. Los puntos en colores son el diagrama de fase de la coordenada  $\theta$   
 Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

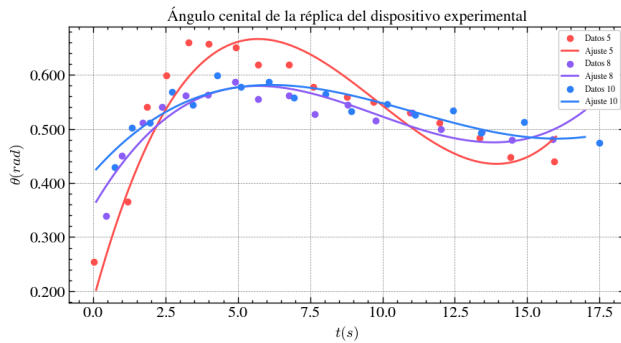


Figura 7.34: Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $\theta$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental

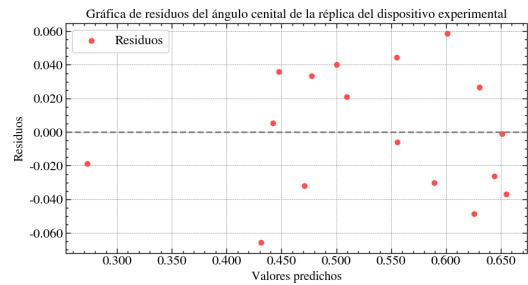


Figura 7.35: Gráfica de residuos de la coordenada  $\theta$  para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

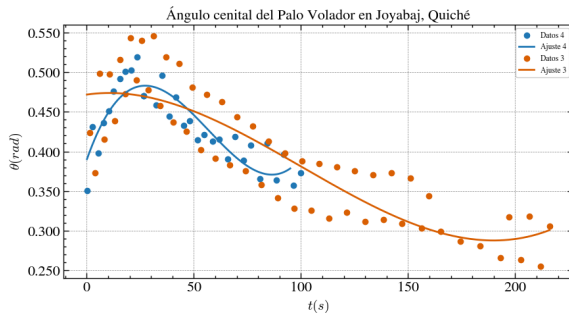


Figura 7.36: Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $\theta$  en función del tiempo para dos conjuntos de datos obtenidos del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

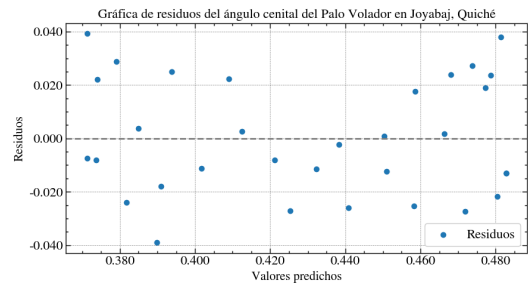


Figura 7.37: Gráfica de residuos de la coordenada  $\theta$  para el conjunto de datos del video 4 del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

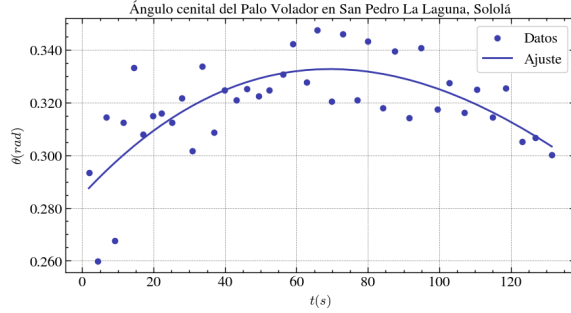


Figura 7.38: Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $\theta$  en función del tiempo para el conjunto de datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

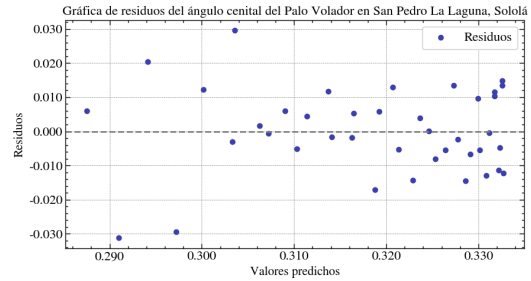


Figura 7.39: Gráfica de residuos de la coordenada  $\theta$  para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.33, en la esquina superior derecha se tiene la gráfica de  $\theta$  en función del tiempo de la simulación del modelo teórico, para esta comparación no se optó por comparar el diagrama de fase dado que la forma en que se presentó no resulta adecuada para el análisis. En el gráfico se puede observar que el ángulo cenital es monótonamente decreciente.

En la Figura 7.34 se tienen 3 de los 30 conjuntos de datos para el ángulo cenital en la réplica del dispositivo experimental. El conjunto de datos 5 empieza alrededor de  $0.25 \text{ rad}$  ( $14.3 \text{ grados}$ ), tiene su máximo absoluto alrededor de  $0.65 \text{ rad}$  ( $37.2 \text{ grados}$ ), luego empieza a decrecer hasta llegar alrededor de  $0.450 \text{ rad}$  ( $25.8 \text{ grados}$ ). El conjunto de datos 8 empieza alrededor de  $0.35 \text{ rad}$  ( $20.1 \text{ grados}$ ) y tiene su máximo absoluto alrededor de  $0.600 \text{ rad}$  ( $34.4 \text{ grados}$ ) en el segundo 5, luego empieza a decrecer hasta llegar alrededor de  $0.500 \text{ rad}$  ( $28.6 \text{ grados}$ ). El conjunto de datos 10 empieza alrededor de  $0.425 \text{ rad}$  ( $24.1 \text{ grados}$ ), tiene su máximo absoluto aproximadamente en  $0.600 \text{ rad}$  ( $34.4 \text{ grados}$ ) en el segundo 5, luego decrece hasta llegar alrededor de  $0.500 \text{ rad}$  ( $28.6 \text{ grados}$ ). En la Figura 7.35 se tiene el gráfico de residuos del ajuste del conjunto de datos 5, esta no presenta ningún patrón alrededor de cero.

En la Figura 7.36 se tienen dos conjuntos de datos del ángulo cenital del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. El conjunto de datos 3 muestra la trayectoria completa del bailarín, mientras que el conjunto de datos 4 muestra la mitad del recorrido (ésta fue grabada con el dron desde una posición distinta al conjunto de datos 3).

El conjunto de datos 3 empieza alrededor de  $0.375 \text{ rad}$  ( $21.5 \text{ grados}$ ), alcanza su máximo absoluto alrededor del segundo 25.0 con  $0.550 \text{ rad}$  ( $31.5 \text{ grados}$ ), luego empieza a decrecer llegando hasta  $0.250 \text{ rad}$  ( $14.3 \text{ grados}$ ).

El conjunto de datos 4 empieza alrededor de  $0.350 \text{ rad}$  ( $20.1 \text{ grados}$ ) y tiene su máximo absoluto alrededor de  $0.525 \text{ rad}$  ( $30.1 \text{ grados}$ ), luego empieza a decrecer llegando hasta alrededor de  $0.350 \text{ rad}$  ( $20.1 \text{ grados}$ ). Nótese que el conjunto de datos 4 no reproduce los valores máximos en el segundo 20.0. Además, nótese que el conjunto de datos 3 tiene datos arriba del ajuste y por debajo del ajuste; los puntos superiores representan el lado derecho de la parte lateral del Palo Volador, mientras que los puntos inferiores representan el lado izquierdo, esto no se observa en el video 4 dado que se tomó desde otra posición.

En la Figura 7.37 se tiene el gráfico de residuos para el ajuste del conjunto de datos 4, ésta no presenta ningún patrón alrededor de cero. El coeficiente de determinación del ajuste del conjunto de datos 3 es de  $R^2 = 0.75$ , y el ajuste del conjunto de datos 4 es de  $R^2 = 0.77$ .

En la Figura 7.38 se muestra el gráfico del ángulo cenital del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. El conjunto de datos empieza alrededor de  $0.260 \text{ rad}$ , alcanza su máximo absoluto alrededor de  $0.350 \text{ rad}$ , luego decrece hasta alrededor de  $0.300 \text{ rad}$ . Nótese que la grabación de este conjunto de datos no logró mostrar la trayectoria completa del bailarín, razón por lo cual no se muestra el decrecimiento que los Gráficos 7.34 y 7.36 tienen. En la Figura 7.39 se tiene el gráfico de residuos de la Figura 7.38, ésta no presenta ningún patrón alrededor de cero.

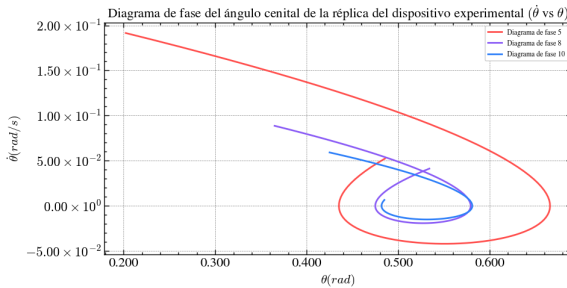


Figura 7.40: Diagrama de fase del ángulo cenital obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos en la réplica del dispositivo experimental

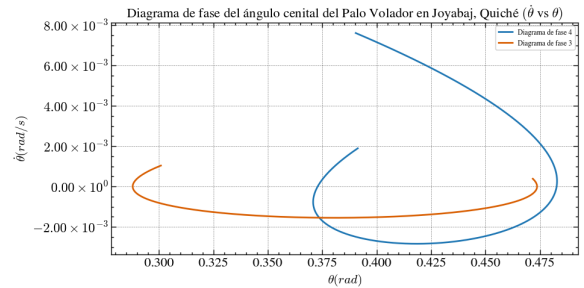


Figura 7.41: Diagrama de fase del ángulo cenital obtenidas a partir de los ajustes realizados a 2 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

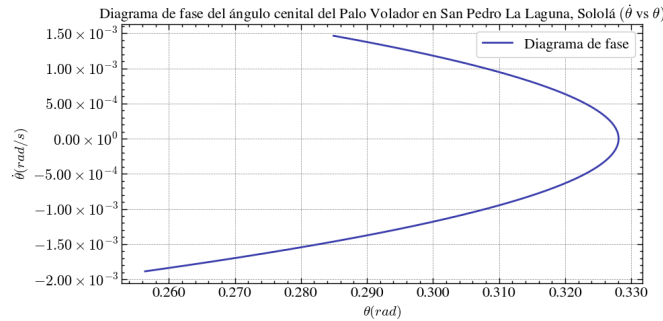


Figura 7.42: Diagrama de fase del ángulo cenital obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.40 se encuentra el diagrama de fase del ángulo cenital de 3 de las 30 gráficas de la réplica del dispositivo experimental. Se observa que la velocidad del conjunto de datos 5 empieza alrededor de  $2.00 \times 10^{-1} \text{ rad/s}$  y su posición angular máxima llega hasta  $0.650 \text{ rad}$  ( $37.2 \text{ grados}$ ). El diagrama de fase 8 y 10 tienen velocidades de alrededor de  $9.00 \times 10^{-2} \text{ rad/s}$  y  $6.00 \times 10^{-2} \text{ rad/s}$  respectivamente, llegando a una posición angular máxima alrededor de  $0.580 \text{ rad}$  ( $33.2 \text{ grados}$ ).

En la Figura 7.41 se encuentran 2 diagramas de fase del ángulo cenital del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. El diagrama de fase 4 empieza con una velocidad de alrededor  $7.50 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  con una posición angular máxima de alrededor  $0.485 \text{ rad}$  ( $27.8 \text{ grados}$ ), mientras que el diagrama de fase 3 empieza con una velocidad de alrededor  $0.500 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  con una posición angular máxima de alrededor  $0.475 \text{ rad}$  ( $27.2 \text{ grados}$ ).

En la Figura 7.42 se encuentra el diagrama de fase del ángulo cenital del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. Empieza con una velocidad de alrededor  $1.50 \times 10^{-3} rad/s$  con una posición angular máxima de alrededor  $0.328 rad$  (18.8 *grados*).

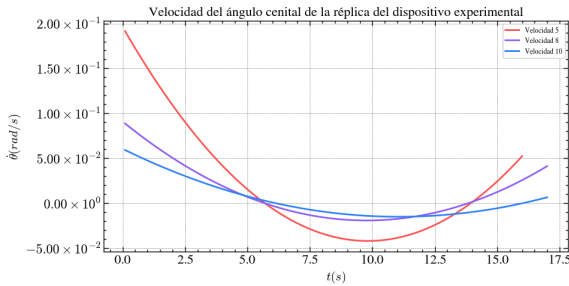


Figura 7.43: Velocidades del ángulo cenital en función del tiempo, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 3 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

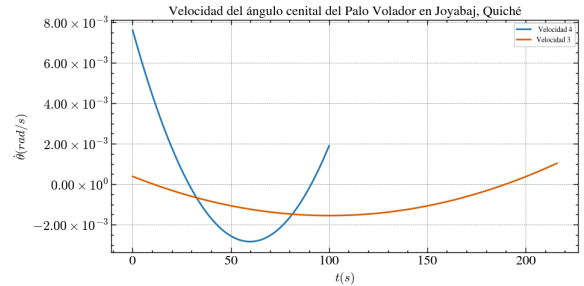


Figura 7.44: Velocidades del ángulo cenital en función del tiempo, obtenidas a partir de los ajustes realizados a 2 conjuntos de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

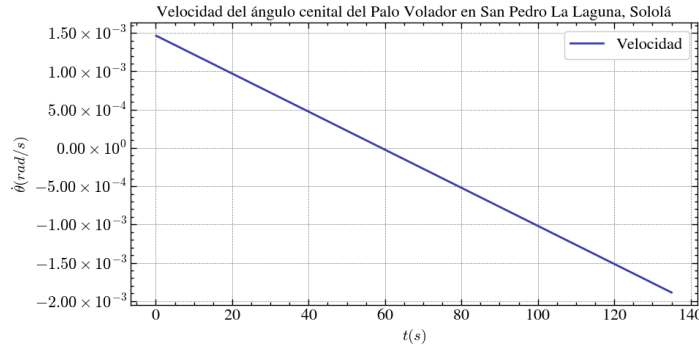


Figura 7.45: Velocidad del ángulo cenital obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.43 se encuentran 3 de las 30 velocidades del conjunto de datos del ángulo cenital de la réplica del dispositivo experimental. La velocidad del conjunto de datos 5 empieza en  $2.00 \times 10^{-1} rad/s$  y decrece hasta una velocidad aproximadamente de  $-5.00 \times 10^{-2} rad/s$  alrededor del segundo 10, luego, la velocidad incrementa hasta llegar  $5.00 \times 10^{-2} rad/s$ . La velocidad del conjunto de datos 8 empieza aproximadamente en  $9.00 \times 10^{-2} rad/s$  decrece hasta una velocidad aproximadamente de  $-2.00 \times 10^{-2} rad/s$  alrededor del segundo 10, luego, la velocidad incrementa hasta llegar  $4.00 \times 10^{-2} rad/s$ . La velocidad del conjunto de datos 10 empieza aproximadamente en  $6.00 \times 10^{-2} rad/s$  decrece hasta una velocidad aproximadamente de  $-2.00 \times 10^{-2} rad/s$  alrededor del segundo 10, luego, la velocidad incrementa hasta llegar  $1.00 \times 10^{-2} rad/s$ .

En la Figura 7.44 se encuentran 2 velocidades del conjunto de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad del conjunto de datos 3 empieza en  $0.500 \times 10^{-3} rad/s$ , y decrece hasta una velocidad aproximadamente de  $-1.50 \times 10^{-3} rad/s$  alrededor del segundo 100, luego, la velocidad incrementa hasta llegar aproximadamente a  $-1.00 \times 10^{-3} rad/s$ . La velocidad del conjunto de datos 4 empieza  $7.50 \times 10^{-3} rad/s$ , y decrece hasta una velocidad aproximadamente de  $-3.00 \times 10^{-3} rad/s$  alrededor del segundo 53, luego, la velocidad incrementa hasta llegar alrededor de  $2.00 \times 10^{-3} rad/s$ .

En la Figura 7.45 se muestra la velocidad del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. Esta empieza en  $1.50 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ , luego decrece hasta aproximadamente  $-2.00 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ , en este gráfico no se observa el punto de inflexión que tienen las Gráficas 7.43 y 7.44 dado que la grabación no logró mostrar la trayectoria completa del bailarín.

Vista desde el cenit en los dispositivos experimentales y los Palos Voladores en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá

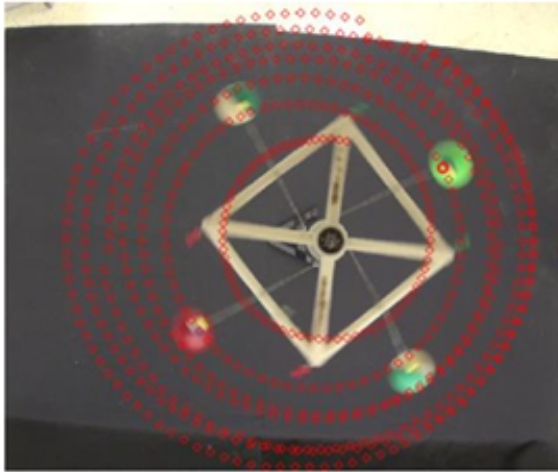


Figura 7.46: Dispositivo experimental del artículo de referencia visto desde arriba  
 Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.



Figura 7.47: Réplica del dispositivo experimental visto desde arriba

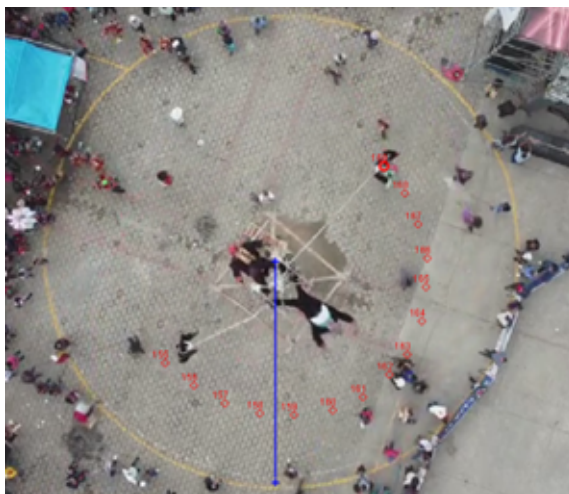


Figura 7.48: Palo Volador en Joyabaj, Quiché visto desde arriba



Figura 7.49: Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá visto desde arriba

Datos para el ángulo azimutal

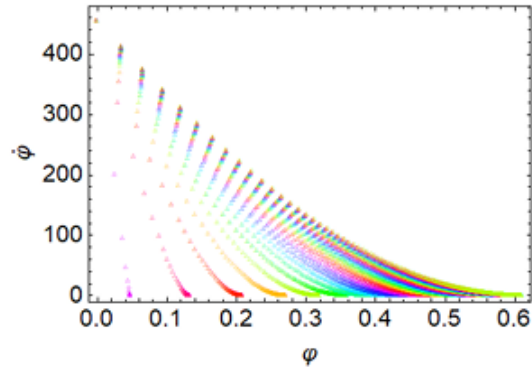


Figura 7.50: Simulación numérica para el diagrama de fase de la coordenada  $\varphi$ . Las diferentes curvas son el resultado de la ejecución del método numérico  
 Nota. Tomado de “Physics in traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky”, por R. Espíndola et al., 2019, Journal of Physics: Conference Series. 1287, 012036.

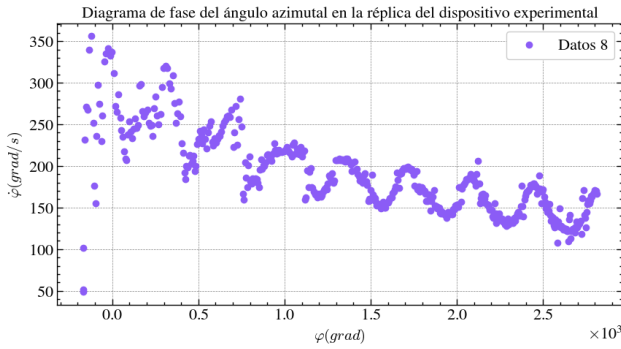


Figura 7.51: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 8 de la réplica del dispositivo experimental

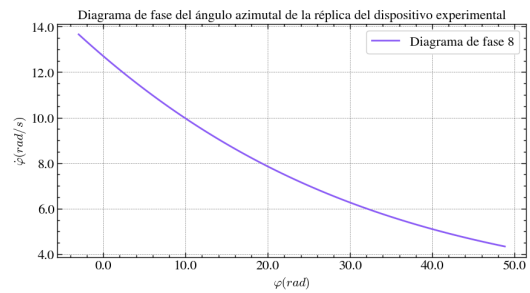


Figura 7.52: Diagrama de fase del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 8

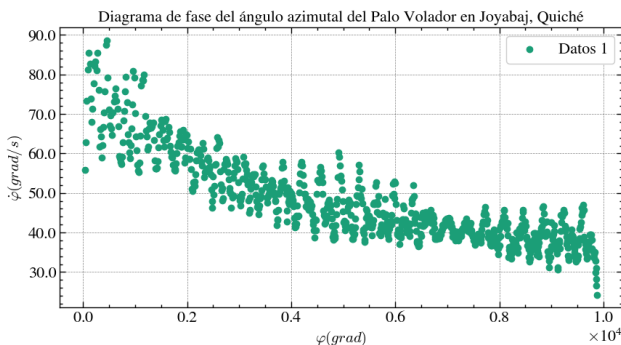


Figura 7.53: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

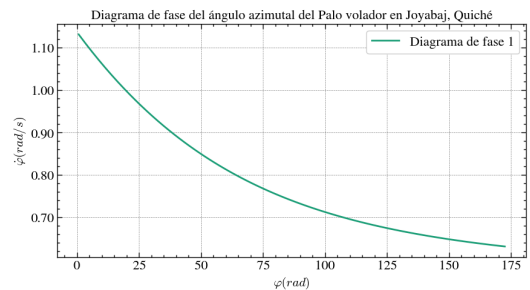


Figura 7.54: Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 1

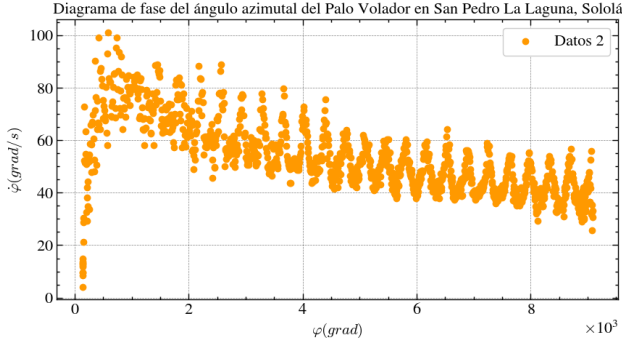


Figura 7.55: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

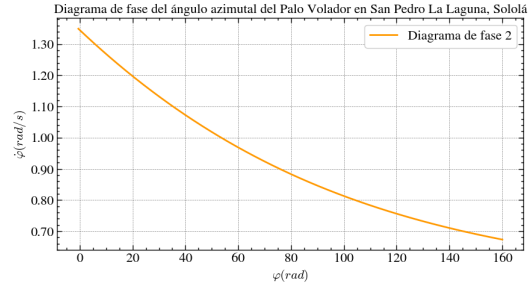


Figura 7.56: Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 2

En la Figura 7.50 se tiene la simulación del diagrama de fase del ángulo azimutal del modelo teórico. En las 35 corridas se observa que empiezan con una velocidad alrededor de 460 *grados/s* y decrecen hasta llegar a cero *grados/s*. Para la primera corrida, se observa que termina en un ángulo alrededor de 0.06, mientras que para la última corrida termina en un ángulo alrededor de 0.6.

En la Figura 7.51 se tiene el diagrama de fase de 1 de los 30 conjuntos de datos experimentales del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental, no se colocaron más datos debido a que su superposición dificultaría su legibilidad. La velocidad inicial es de aproximadamente 50 *grados/s*, y alcanza un máximo absoluto cercano a 350 *grados/s*, esta magnitud decrece con oscilaciones hasta llegar alrededor de 175 *grados/s* en la posición  $2.83 \times 10^3$  *grados* (alrededor de 8 revoluciones). Es decir, decreció aproximadamente 175 *grados/s* desde la velocidad más alta. (En los datos experimentales se mantuvo la unidad de *grados* para hacer la comparación con el artículo).

En el diagrama de fase de la Figura 7.52 se tiene la derivada del ajuste del ángulo azimutal de la réplica. Se observa que la velocidad angular ajustada empieza alrededor de 13.8 *rad/s* y decrece hasta llegar alrededor de 0.400 *rad/s*, llegando a una posición angular de 50.0 *rad* (cercano a 8 vueltas), la derivada del ajuste no reproduce las oscilaciones que los datos tienen. (Los ajustes se mantuvieron en la unidad de radianes para tener concordancia con el resto de los gráficos medidos en el SI).

En la Figura 7.53 se tienen el diagrama de fase del ángulo azimutal de un conjunto de datos experimentales del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, dado que su superposición dificultaría su legibilidad. Inicialmente se registra una velocidad de aproximadamente 55.00 *grados/s* alcanzando su máximo absoluto cercano a 90.0 *grados/s*, esta magnitud decrece con oscilaciones hasta llegar alrededor de 25.0 *grados/s* en la posición  $0.987 \times 10^{-3}$  *grados* (alrededor de 27 revoluciones). Es decir, decreció aproximadamente 65.0 *grados/s* desde la velocidad más alta.

En el diagrama de fase de la Figura 7.54 se tiene la derivada del ajuste del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. Se observa que empieza con aproximadamente  $1.15 \text{ rad/s}$  y decrece hasta alrededor de  $0.65 \text{ rad/s}$  en la posición  $175 \text{ rad}$  (alrededor de 27 revoluciones). La derivada del ajuste tampoco reproduce las oscilaciones que los datos experimentales del Palo Volador de Joyabaj, Quiché.

En la Figura 7.55 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de un conjunto de datos experimentales del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. Se observa que empieza aproximadamente en  $5.00 \text{ grad/s}$ , alcanzando su máximo absoluto alrededor de  $100 \text{ grad/s}$ , esta magnitud decrece con oscilaciones hasta llegar alrededor de  $25.0 \text{ grad/s}$  en la posición  $9.09 \times 10^3 \text{ grados}$  (alrededor de 25 vueltas).

En el diagrama de fase de la Figura 7.56 se tiene la derivada del ajuste del ángulo azimutal para el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. Se observa que empieza con aproximadamente  $1.35 \text{ rad/s}$  y decrece hasta alrededor de  $0.66 \text{ rad/s}$  en la posición  $160 \text{ rad}$  (alrededor de 25 vueltas). La derivada del ajuste tampoco reproduce las oscilaciones que los datos experimentales del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá.

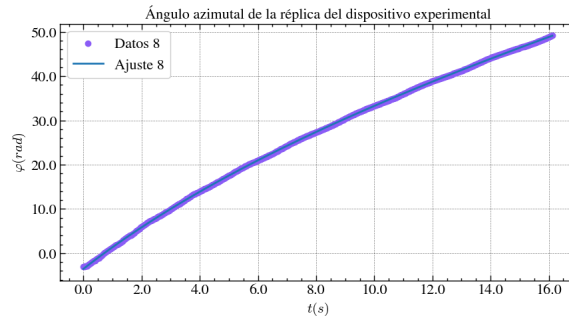


Figura 7.57: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental

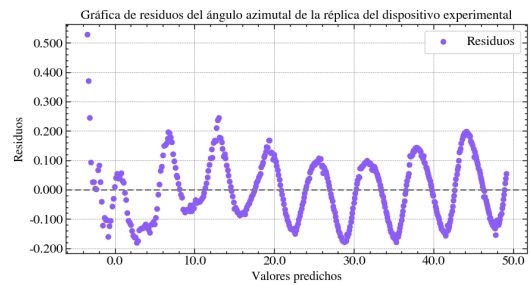


Figura 7.58: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental

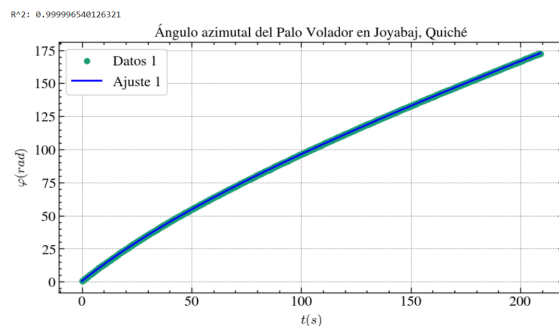


Figura 7.59: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

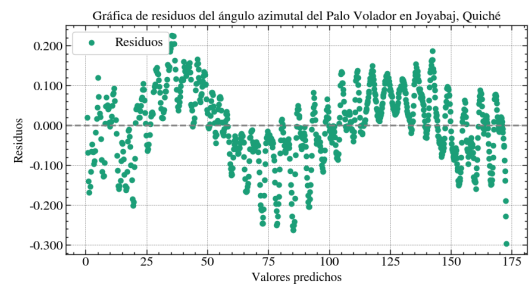


Figura 7.60: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

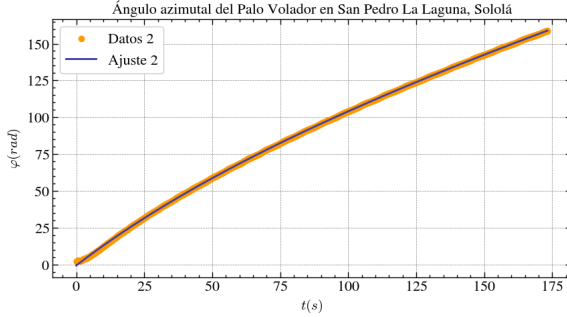


Figura 7.61: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

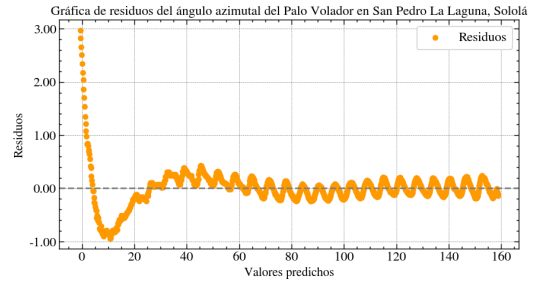


Figura 7.62: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.57 se tiene una de las 30 gráficas del ángulo azimutal en función del tiempo de la réplica del dispositivo experimental. Se puede observar que es monótona creciente, además el modelo obtenido mediante regresión simbólica fue  $1.62 * x + (49.9 * x)/(x + 14.3) - 3.50$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.999$ . En la Figura 7.58 se encuentra el gráfico de residuos de la Figura 7.57, donde se observa un comportamiento oscilatorio.

En la Figura 7.59 se tiene una de las 5 gráficas del ángulo azimutal en función del tiempo del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. Se puede observar que es monótona creciente, además el modelo obtenido mediante regresión simbólica fue  $0.563 * x + (82.6 * x)/(x + 109) + 0.556$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.999$ . En la Figura 7.60 se encuentra el gráfico de residuos de la Figura 7.59, donde se observa un comportamiento oscilatorio.

En la Figura 7.61 se tiene una de las 2 gráficas del ángulo azimutal en función del tiempo del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. Se puede observar que es monótona creciente, además el modelo obtenido mediante regresión simbólica fue  $0.487 * x + (140 * x)/(x + 151) + 0.688$  con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.999$ . En la Figura 7.62 se encuentra el gráfico de residuos de la Figura 7.61, donde se observa un comportamiento oscilatorio.

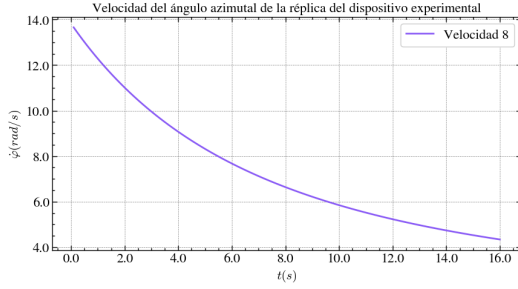


Figura 7.63: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 8 de la réplica del dispositivo experimental

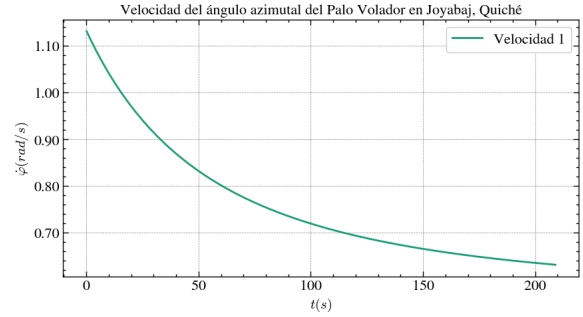


Figura 7.64: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

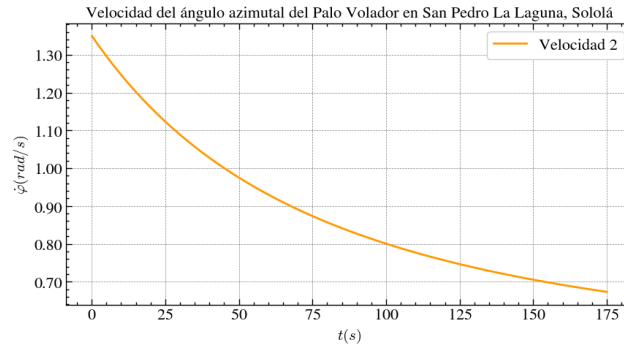


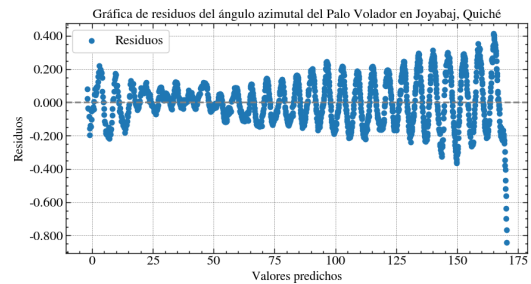
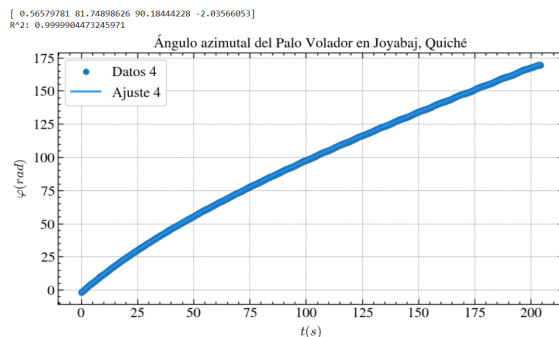
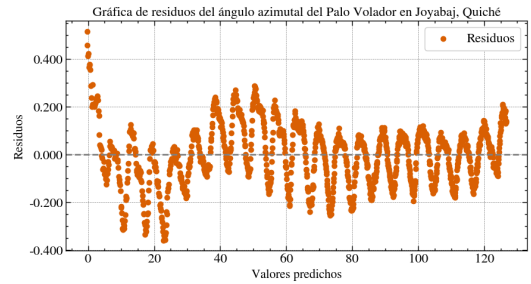
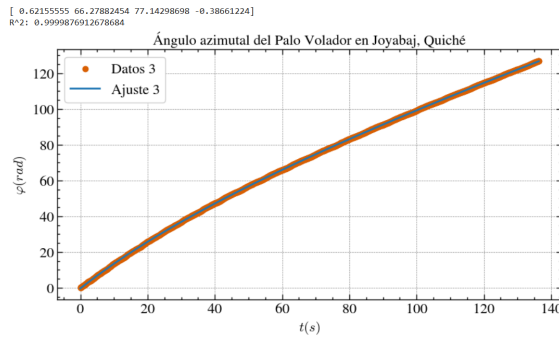
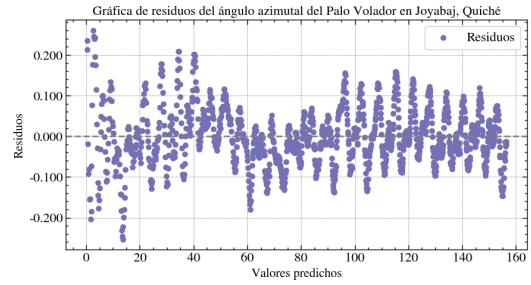
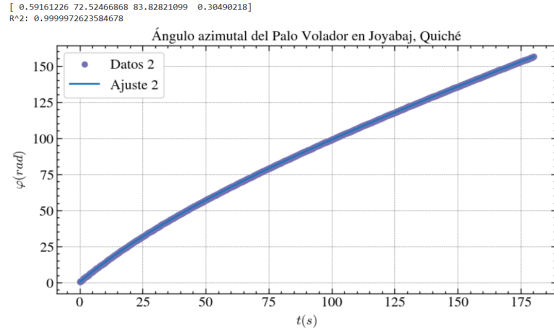
Figura 7.65: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 2 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.63 se tiene 1 de las 30 velocidades del conjunto de datos de la réplica del dispositivo experimental. La velocidad del conjunto de datos 8 empieza en  $13.5 \text{ rad/s}$ , decrece hasta llegar a una velocidad aproximada de  $4.00 \text{ rad/s}$ .

En la Figura 7.64 se tiene 1 de las 5 velocidades del conjunto de datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad del conjunto de datos 1 empieza alrededor de  $1.15 \text{ rad/s}$ , decrece hasta llegar a una velocidad aproximada de  $0.62 \text{ rad/s}$ .

En la Figura 7.65 se tiene 1 de las 2 velocidades del conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La velocidad del conjunto de datos 2 empieza alrededor de  $1.35 \text{ rad/s}$ , decrece hasta llegar a una velocidad aproximada de  $0.66 \text{ rad/s}$ .

Gráficos del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché para los conjuntos de datos del video 2, video 3, video 4 y video 5



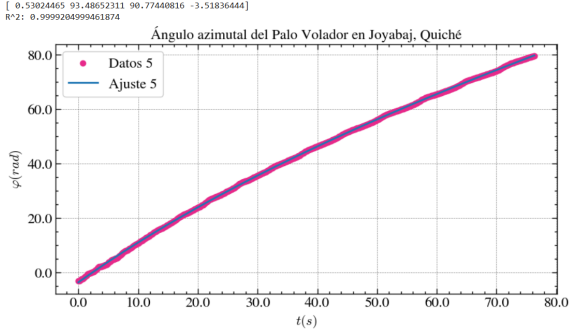


Figura 7.72: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

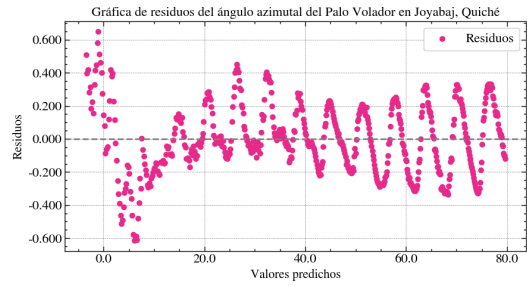


Figura 7.73: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

En las Figuras 7.66, 7.68, 7.70, 7.72 se tienen los puntos experimentales del conjunto de datos 2, 3, 4 y 5 del ángulo zenital del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, con el ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. El coeficiente de determinación de todas las gráficas mencionadas fue  $R^2 = 0.999$ . A su derecha, en las Figuras 7.67, 7.69, 7.71, 7.73 se encuentra su respectiva gráfica de residuos, se puede observar que regresión simbólica tampoco logró reproducir las oscilaciones que el conjunto de datos tiene.

En las siguientes figuras se tiene los diagramas de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales del conjunto de datos 2, conjunto de datos 3, conjunto de datos 4 y conjunto de datos 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

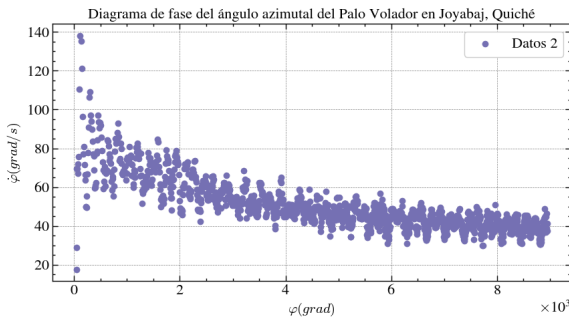


Figura 7.74: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 2 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

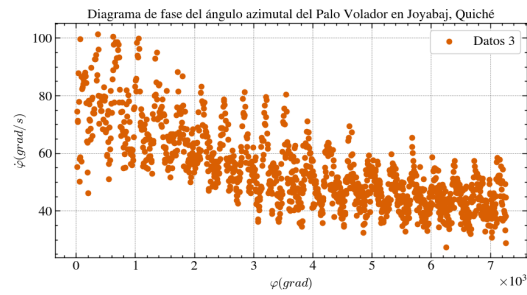


Figura 7.75: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

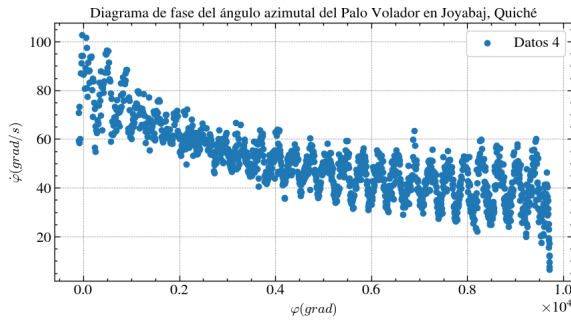


Figura 7.76: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

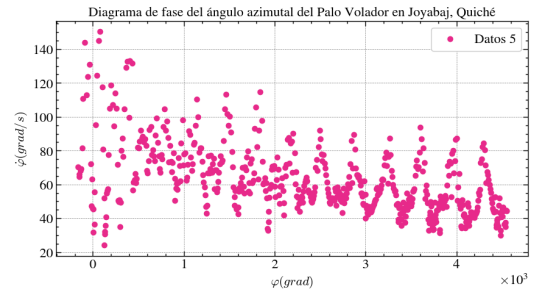


Figura 7.77: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

En las Figuras 7.74, 7.75, 7.76, 7.77 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales del Palo Volador en Joyabaj, Quiché para el conjunto de datos 2, 3, 4 y 5.

El conjunto de datos 2 empieza aproximadamente en  $20.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $140 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $40.0 \text{ grad/s}$ . (En los datos experimentales se mantuvo la unidad de grados para hacer la comparación con el artículo).

El conjunto de datos 3 empieza aproximadamente en  $45.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $100 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $30.0 \text{ grad/s}$ .

El conjunto de datos 4 empieza aproximadamente en  $60.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $100 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $15.0 \text{ grad/s}$ .

El conjunto de datos 5 empieza aproximadamente en  $20.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo alrededor de  $150 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $30.0 \text{ grad/s}$ .

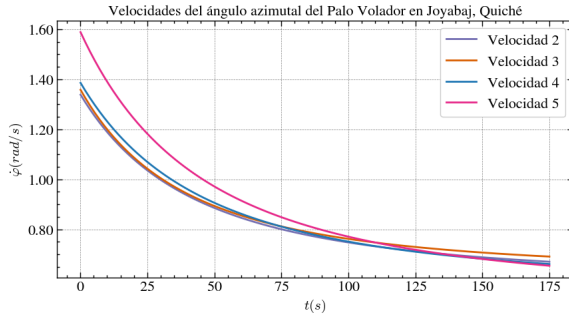


Figura 7.78: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 2, video 3, video 4 y video 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

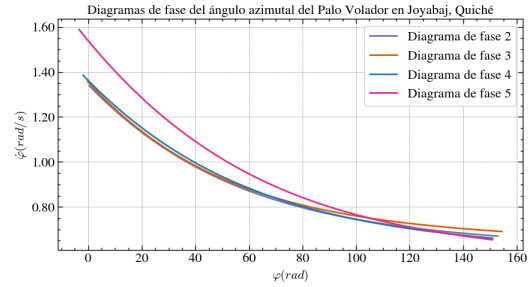


Figura 7.79: Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La obtención de la gráfica fue a partir de las derivadas de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 2, video 3, video 4 y video 5

En la Figura 7.78 se tienen las velocidades del ángulo azimutal del conjunto de datos 2, 3, 4 y 5 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que la velocidad 5 empieza en  $1.60 \text{ rad/s}$ , mientras que las velocidades 2, 3 y 4 empiezan alrededor de  $1.40 \text{ rad/s}$ , las velocidades decrecen hasta llegar a aproximadamente  $0.700 - 0.650 \text{ rad/s}$ .

En la Figura 7.79 se tienen los diagramas de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que las velocidades decrecen a medida en que el bailarín desciende del mástil.

En las siguientes figuras se tienen los gráficos del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental, para los conjuntos de datos del video 5 y video 10

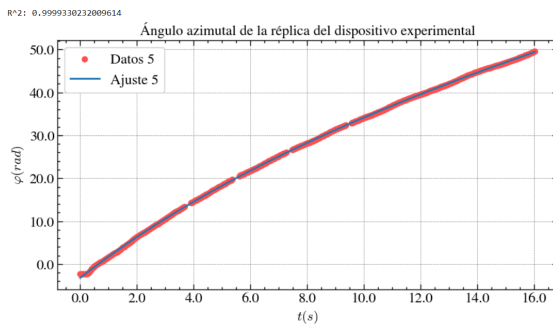


Figura 7.80: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

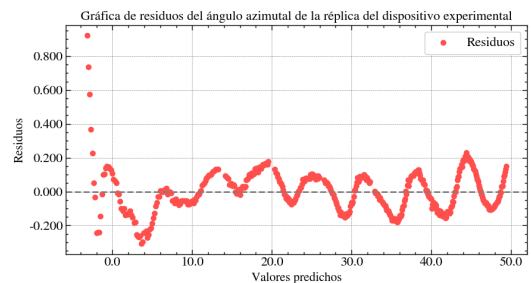


Figura 7.81: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

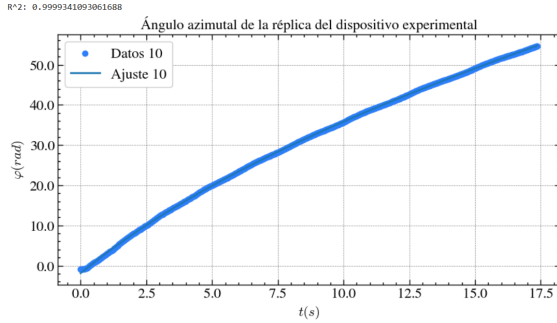


Figura 7.82: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 10 de la réplica del dispositivo experimental

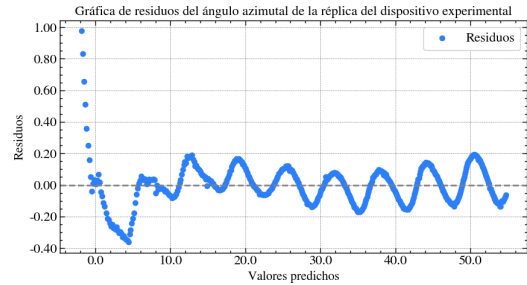


Figura 7.83: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 10 de la réplica del dispositivo experimental

En las Figuras 7.80 y 7.82 se tienen los puntos experimentales del conjunto de datos 5 y 10 del ángulo zenital de la réplica del dispositivo experimental, con el ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. El coeficiente de determinación de las gráficas mencionadas fue  $R^2 = 0.999$ . A su derecha, en las Figuras 7.81 y 7.83 se encuentra su respectiva gráfica de residuos, se puede observar que regresión simbólica tampoco logró reproducir las oscilaciones que el conjunto de datos tiene.

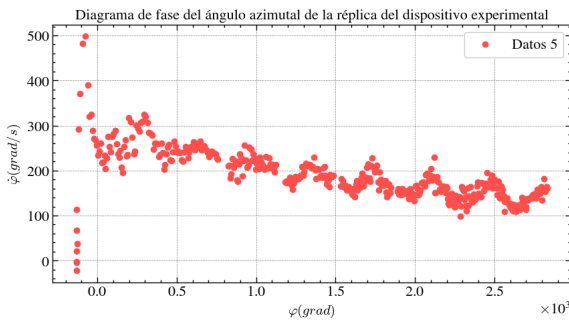


Figura 7.84: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 5 de la réplica del dispositivo experimental

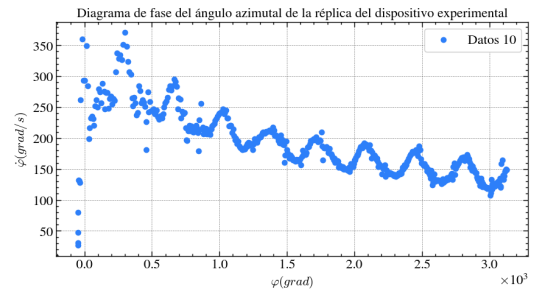


Figura 7.85: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 10 de la réplica del dispositivo experimental

En las Figuras 7.84 y 7.85 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales de la réplica del dispositivo experimental para el conjunto de datos 5 y 10.

El conjunto de datos 5 empieza aproximadamente en  $0.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $500 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $150 \text{ grad/s}$ .

El conjunto de datos 10 empieza aproximadamente en  $25.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $375 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $150 \text{ grad/s}$ .

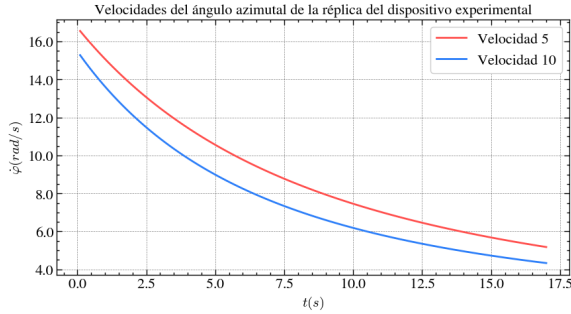


Figura 7.86: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo, obtenido a partir de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 5 y video 10 de la réplica del dispositivo experimental

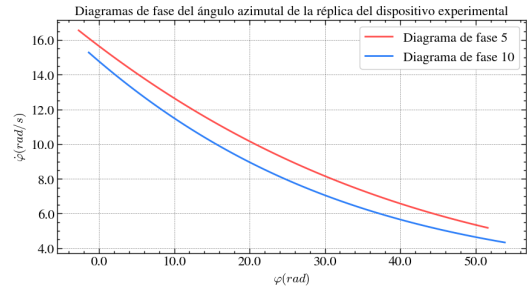


Figura 7.87: Diagrama de fase del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental. La obtención de la gráfica fue a partir de las derivadas de los ajustes realizados al conjunto de datos del video 5 y video 10

En la Figura 7.86 se tienen las velocidades del ángulo azimutal del conjunto de datos 5 y 10 de la réplica del dispositivo experimental obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que la velocidad 5 empieza en  $16.5 \text{ rad/s}$ , mientras que la velocidad 10 empiezan alrededor de  $15.5 \text{ rad/s}$ , estas velocidades decrecen hasta llegar a aproximadamente  $5.00 \text{ rad/s}$   $4.50 \text{ rad/s}$  respectivamente.

En la Figura 7.87 se tienen los diagramas de fase del ángulo azimutal de la réplica del dispositivo experimental obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que las velocidades decrecen a medida en que el bailarín desciende del mástil.

Gráficas del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá, para el conjunto de datos del video 1

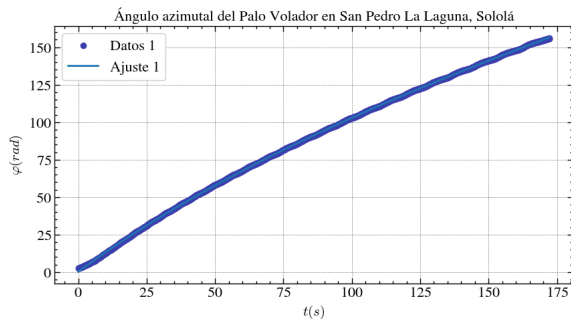


Figura 7.88: Puntos experimentales y uso de regresión simbólica a la coordenada  $\varphi$  en función del tiempo, para los datos obtenidos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

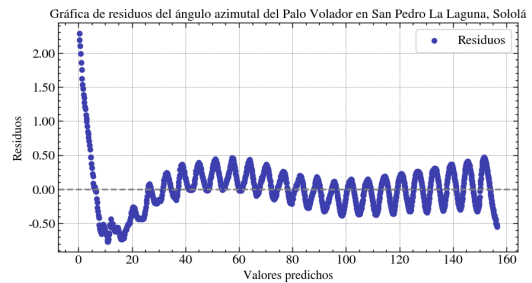


Figura 7.89: Gráfica de residuos de la coordenada  $\varphi$  para el conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

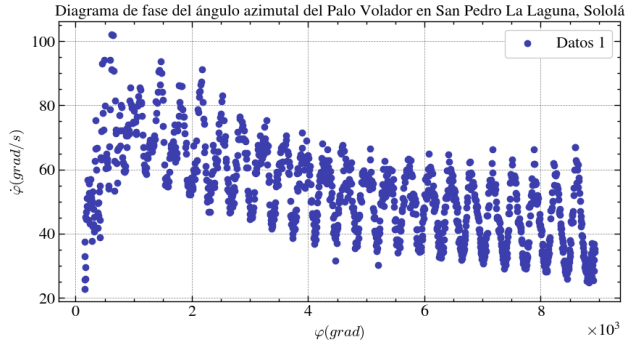


Figura 7.90: Diagrama de fase del ángulo azimutal obtenido a partir de los datos experimentales del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

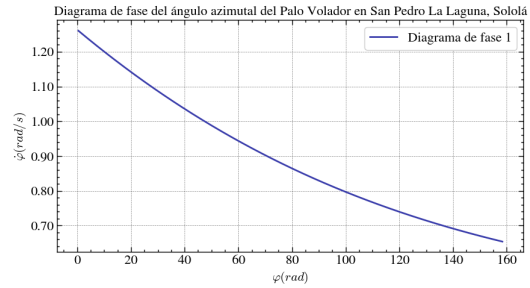


Figura 7.91: Diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La obtención de la gráfica fue a partir de la derivada del ajuste del ángulo azimutal del conjunto de datos del video 1

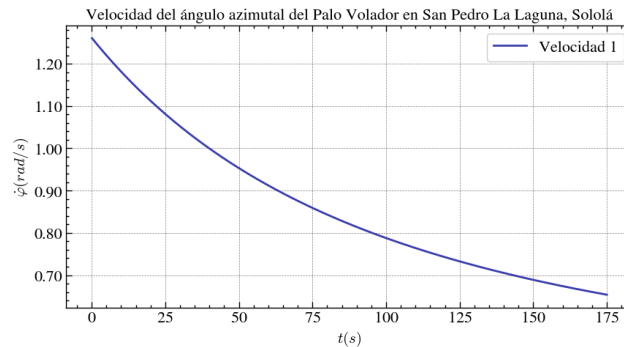


Figura 7.92: Velocidad del ángulo azimutal en función del tiempo obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 1 del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.88 se tiene los puntos experimentales del ángulo azimutal y el ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró en el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá, esta gráfica tuvo un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.999$ , a su derecha, en la Figura 7.89 se tiene el gráfico de residuos, se puede observar que regresión simbólica no reproduce las oscilaciones que los datos tienen. En el gráfico de residuos se observa que tampoco reproduce el estado inicial de los datos hasta el segundo 10.

En la Figura 7.90 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. El conjunto de datos empieza aproximadamente en  $20.0 \text{ grad/s}$ , tiene su máximo absoluto alrededor de  $105 \text{ grad/s}$  y se puede observar el ángulo azimutal decrece con oscilaciones a medida en que los bailarines dan vueltas alrededor del mástil. La velocidad termina alrededor de  $35.0 \text{ grad/s}$ . (En los datos experimentales se mantuvo la unidad de grados para hacer la comparación con el artículo).

En la Figura 7.91 se tienen el diagrama de fase del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que la velocidad empieza en  $1.26 \text{ rad/s}$  y decrece a medida en que el bailarín desciende del mástil. (Los ajustes se mantuvieron en la unidad de radianes para tener concordancia con el resto de los gráficos medidos en el SI).

En la Figura 7.92 se tiene la velocidad del ángulo azimutal del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá obtenido a partir de la derivada del ajuste de la ecuación que regresión simbólica encontró. Se puede observar que la velocidad empieza en  $1.26 \text{ rad/s}$ , y decrece hasta llegar a aproximadamente  $0.650 \text{ rad/s}$ .

### Gráficas para el radio

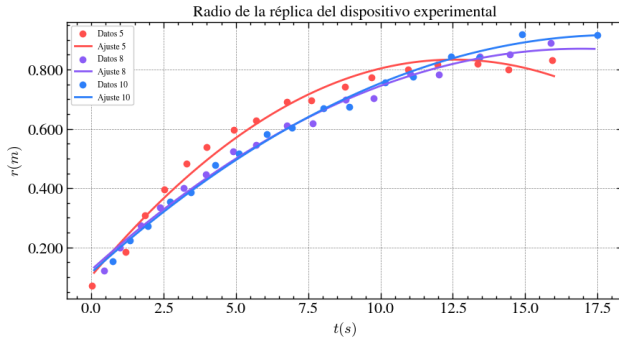


Figura 7.93: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $r$  en función del tiempo para tres conjuntos de datos obtenidos de la réplica del dispositivo experimental

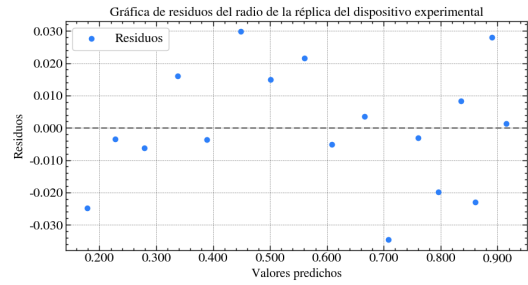


Figura 7.94: Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del video 10

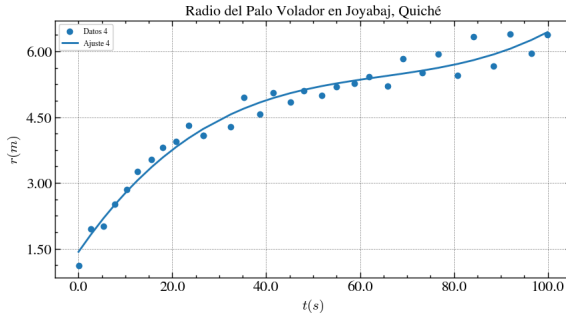


Figura 7.95: Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $r$  en función del tiempo a los datos obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

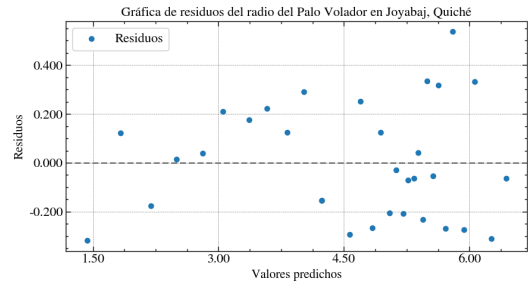


Figura 7.96: Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del video 4

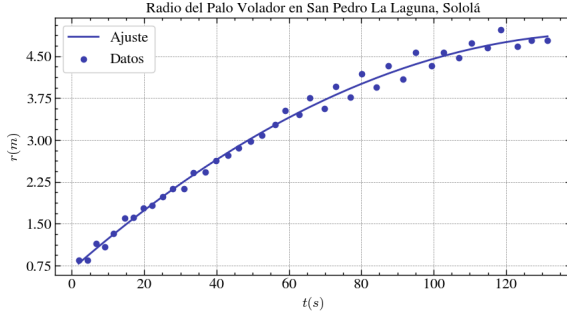


Figura 7.97: Puntos experimentales y ajuste cuadrático de la coordenada  $r$  en función del tiempo a los datos obtenidos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

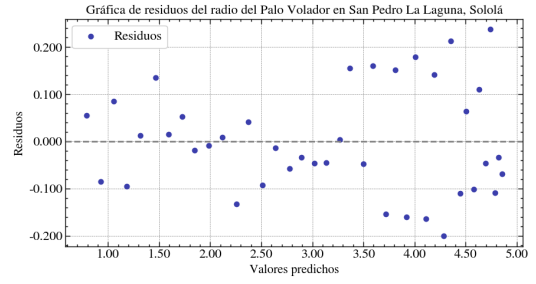


Figura 7.98: Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna

En la Figura 7.93 se tiene 3 de los 30 conjuntos de datos del radio con su respectivo ajuste de la réplica del dispositivo experimental. El conjunto de datos 5 empieza aproximadamente con  $0.050\text{ m}$  y termina alrededor de  $0.825\text{ m}$ . El conjunto de datos 8 empieza aproximadamente con  $0.125\text{ m}$  y termina con un radio de  $0.900\text{ m}$ . El conjunto de datos 10 empieza aproximadamente con  $0.15\text{ m}$  y termina con un radio de  $0.925\text{ m}$ . En la Figura 7.94 se tiene el gráfico de residuos del conjunto de datos 10 de la Figura 7.93, esta no presenta ningún patrón alrededor de cero indicando un ajuste adecuado.

En la Figura 7.95 se tiene uno de los gráficos del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. El conjunto de datos 1 empieza alrededor de  $1.13\text{ m}$  siendo cóncava hacia abajo, luego, tiene un punto de inflexión aproximadamente en el segundo  $65.0$ , finalmente termina con un radio de aproximadamente  $6.38\text{ m}$ . En la Figura 7.96 se tiene el gráfico de residuos del conjunto de datos 1 de la Figura 7.95, esta no presenta ningún patrón alrededor de cero indicando un ajuste adecuado.

En la Figura 7.97 se tiene el gráfico del radio del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. El conjunto de datos empieza alrededor de  $0.750\text{ m}$  y termina con un radio de aproximadamente  $4.88\text{ m}$ . En la Figura 7.98 se tiene el gráfico de residuos de la Figura 7.97, esta no presenta ningún patrón alrededor de cero indicando un ajuste adecuado.

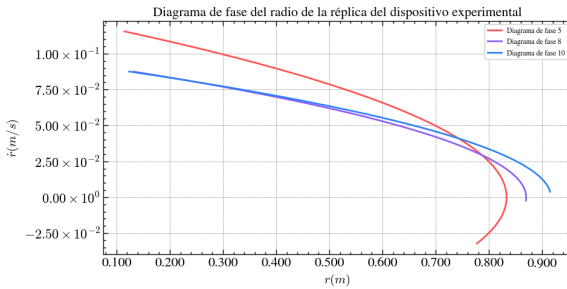


Figura 7.99: Diagrama de fase del radio, obtenido a partir de ajustes realizados a tres conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

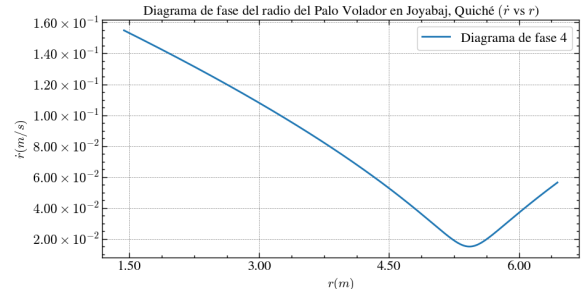


Figura 7.100: Diagrama de fase del radio, obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

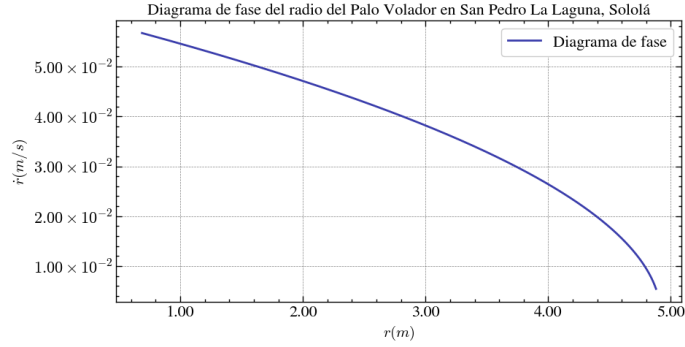


Figura 7.101: Diagrama de fase del radio obtenido a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.99 se tiene el diagrama de fase de 3 de los 30 conjuntos de datos del radio de la réplica del dispositivo experimental. Se puede observar que, para la forma en que se tomaron los datos, el diagrama de fase del conjunto de datos 5 empieza con una velocidad de  $1.15 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad decrece hasta  $0.500 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  en la posición  $0.840 \text{ m}$ , luego tiene un punto de inflexión y termina en la posición  $0.780 \text{ m}$  con una velocidad de  $-1.50 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ . El diagrama de fase del conjunto de datos 8 y 10 empieza en  $9.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  y terminan con una velocidad alrededor de cero, en la posición  $0.860 \text{ m}$  y  $0.920 \text{ m}$  respectivamente.

En la Figura 7.100 se encuentra uno de los diagramas de fase del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. El diagrama de fase del conjunto de datos 4 empieza con una velocidad aproximadamente de  $1.55 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad decrece hasta aproximadamente  $1.50 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  en la posición  $5.44 \text{ m}$ , luego, tiene un punto de inflexión y la velocidad incrementa alrededor de  $6.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

En la Figura 7.101 se tiene el diagrama de fase del radio del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La velocidad empieza alrededor de  $5.80 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ , luego decrece y termina con una velocidad aproximadamente de  $0.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  en la posición  $4.88 \text{ m}$ .

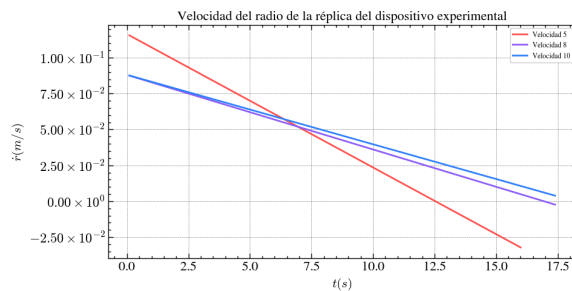


Figura 7.102: Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir de los ajustes realizados a tres conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental

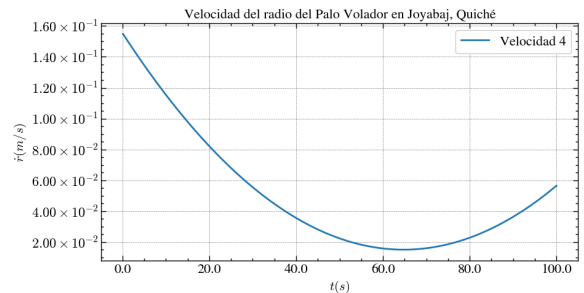


Figura 7.103: Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 4 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

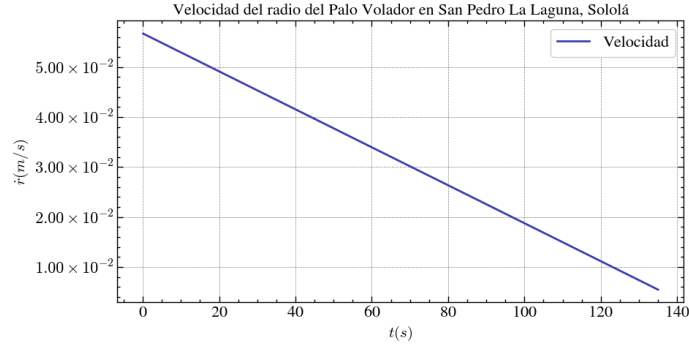


Figura 7.104: Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

En la Figura 7.102, se tiene 3 de las 30 velocidades del conjunto de datos del radio en la réplica del dispositivo experimental. La velocidad del conjunto de datos 5 empieza con  $1.15 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad termina con  $-1.50 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ . La velocidad del conjunto de datos 8 y 10 empieza en  $9.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  y terminan con una velocidad alrededor de cero  $\text{m/s}$ .

En la Figura 7.103 se encuentra el gráfico de una de las velocidades del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad del conjunto de datos 4 empieza aproximadamente en  $1.55 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ , la velocidad decrece hasta aproximadamente  $1.50 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  en la posición 5.44 m, luego, tiene un punto de inflexión en el segundo 65.0 y la velocidad incrementa hasta alrededor de  $6.00 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

En la Figura 7.104 se encuentra el gráfico de una de las velocidades del radio del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. La velocidad empieza alrededor de  $5.80 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ , luego decrece y termina con una velocidad aproximadamente de  $0.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

En las siguientes figuras se tienen las gráficas del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché para el conjunto de datos del video 3

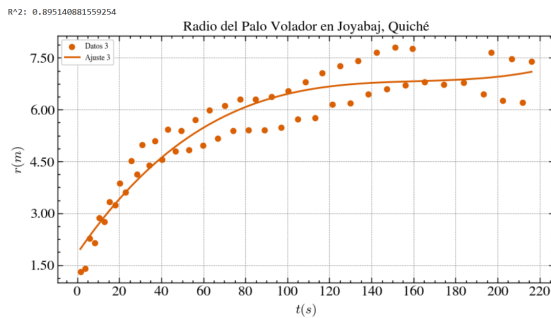


Figura 7.105: Puntos experimentales y ajuste cúbico de la coordenada  $r$  en función del tiempo a los datos obtenidos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

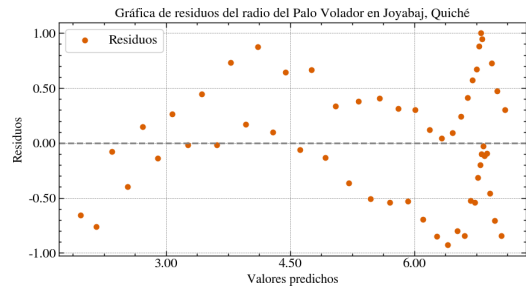


Figura 7.106: Gráfico de residuos de la coordenada  $r$  para el conjunto de datos del video 3

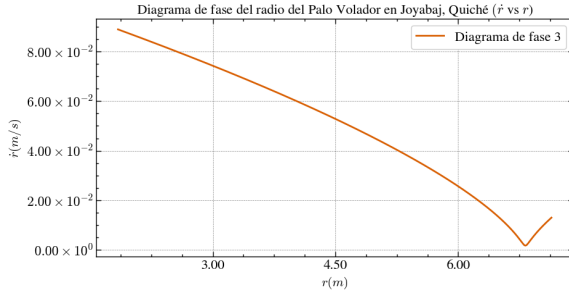


Figura 7.107: Diagrama de fase del radio, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

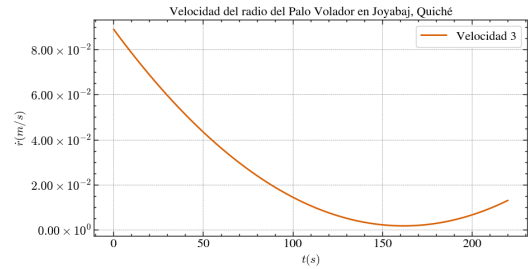


Figura 7.108: Velocidad del radio en función del tiempo, obtenida a partir del ajuste realizado al conjunto de datos del video 3 del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

En la Figura 7.105 se tiene el conjunto de datos 3 del radio con su respectivo ajuste, en el Palo Volador en Joyabaj, Quiché. El ajuste cúbico tuvo un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.895$ , sin embargo, el gráfico de residuos de la Figura 7.106 parece tener una tendencia no aleatoria alrededor de cero.

Los puntos que se observan arriba del ajuste representan el lado derecho de la parte lateral del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, mientras que los puntos inferiores al ajuste representan el lado izquierdo de la parte lateral del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, este comportamiento no es evidente en la Figura 7.95 dado que se tomó desde otra posición, diferente a la Figura 7.105. Además, el radio empieza alrededor de  $1.50$  m y termina con un radio alrededor de  $7.50$  m.

En la Figura 7.107 se tiene el diagrama de fase del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché. La velocidad empieza alrededor de  $9.00 \times 10^{-2}$  m/s, la velocidad decrece a medida que el radio crece, se puede observar que en la posición aproximada de  $6.75$  m se tiene un punto de inflexión, luego de ese punto, la velocidad crece hasta  $1.50 \times 10^{-2}$  m/s.

En la Figura 7.108 se tiene la velocidad del radio del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, se observa que empieza alrededor de  $9.00 \times 10^{-2}$  m/s y termina en una velocidad aproximadamente de  $1.50 \times 10^{-2}$  m/s.

## 7.2. El Palo Volador y las leyes de Kepler

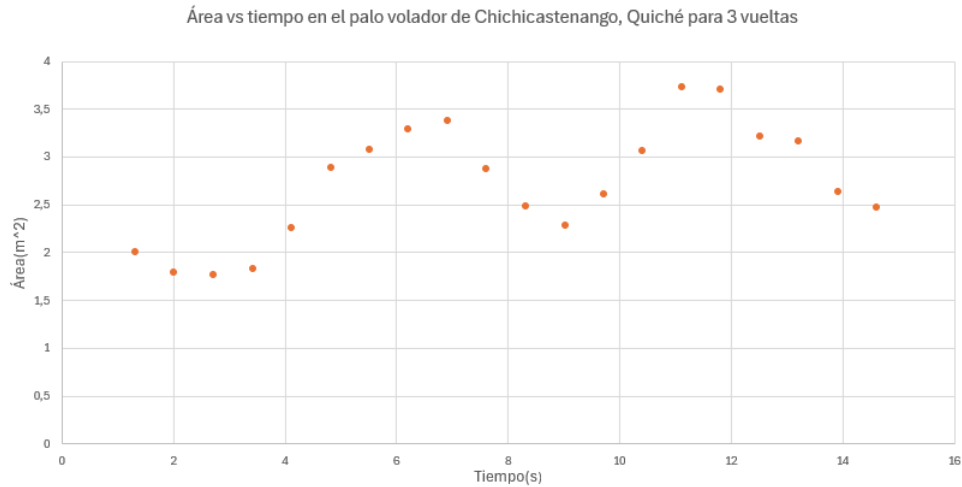


Figura 7.109: Área contra tiempo del Palo Volador de Chichicastenango, Quiché

Se tomaron datos del área en el Palo Volador de Chichicastenango, Quiché cada 0.700s en 3 vueltas. Se observan oscilaciones durante el trayecto.

Tabla 7.2: Área e incertidumbre de los datos experimentales en Chichicastenango, Quiché

Nº	Área ( $m^2$ )	Incertidumbre ( $m^2$ )
1	2.01	0.03
2	1.79	0.02
3	1.77	0.02
4	1.83	0.02
5	2.26	0.03
6	2.89	0.04
7	3.07	0.05
8	3.28	0.05
9	3.38	0.04
10	2.87	0.03
11	2.49	0.03
12	2.29	0.03
13	2.62	0.03
14	3.07	0.04
15	3.73	0.06
16	3.71	0.06
17	3.22	0.05
18	3.17	0.04
19	2.64	0.03
20	2.48	0.03

En la tabla se muestran las 20 áreas tomadas con su respectivo incertidumbre.

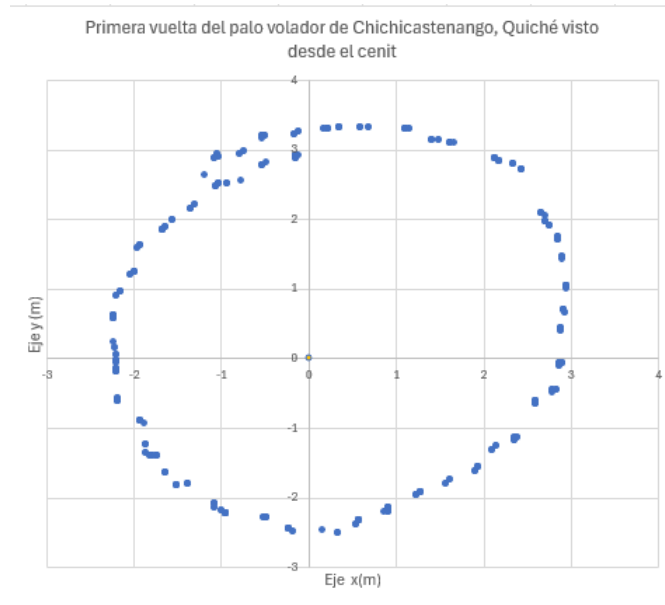


Figura 7.110: Primera vuelta del Palo Volador de Chichicastenango, Quiché

En la Figura 7.110, el centro amarillo es el vértice superior del Palo Volador de Chichicastenango, Quiché; se presenta la trayectoria del bailarín para la primera vuelta.

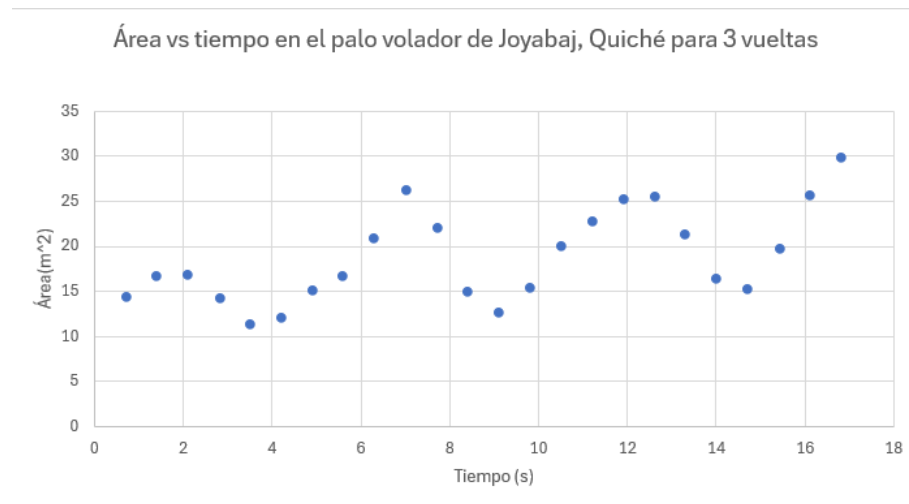


Figura 7.111: Área contra tiempo del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

Se tomaron datos del área en el Palo Volador de Joyabaj, Quiché cada 0.700s en 3 vueltas. Se observan oscilaciones durante el trayecto.

Tabla 7.3: Área e incertidumbre de los datos experimentales en Joyabaj, Quiché

Nº	Área ( $m^2$ )	Incertidumbre ( $m^2$ )
1	14.6	0.2
2	16.7	0.2
3	17.0	0.2
4	14.4	0.2
5	11.6	0.1
6	12.2	0.1
7	15.1	0.2
8	16.7	0.2
9	21.0	0.3
10	26.2	0.3
11	22.1	0.3
12	15.0	0.2
13	12.8	0.1
14	15.5	0.2
15	20.1	0.2
16	22.8	0.3
17	25.4	0.3
18	25.7	0.3
19	21.4	0.3
20	16.4	0.2
21	15.4	0.2
22	19.7	0.2
23	25.8	0.3
24	29.9	0.4

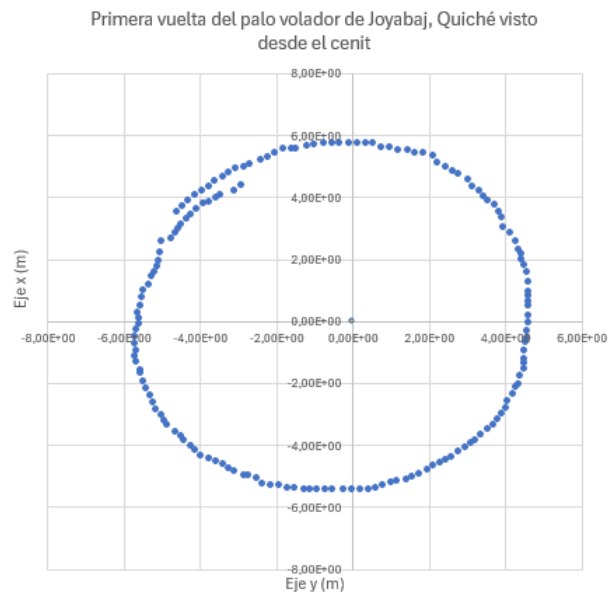


Figura 7.112: Primera vuelta del Palo Volador de Joyabaj, Quiché

En la Figura 7.112, el centro amarillo es el vértice superior del Palo Volador de Joyabaj, Quiché; se presenta la trayectoria del bailarín para la primera vuelta.

El objetivo general de este trabajo es comparar el modelo teórico presentado en *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky* con datos experimentales obtenidos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en San Pedro La Laguna, Sololá y en una réplica del dispositivo experimental descrito en el artículo, utilizando métodos de regresiones para analizar su comportamiento, con el fin de evaluarlo en condiciones reales e identificando similitudes y diferencias. Además de explorar las analogías entre el movimiento de un bailarín del Palo Volador de Joyabaj, Quiché y Chichicastenango, Quiché y los movimientos astronómicos.

En las Figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 se encuentran el dispositivo experimental del artículo de referencia, la réplica del dispositivo experimental, el Palo Volador en Joyabaj, Quiché y el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá. El análisis comparativo que se hizo es entre los datos experimentales y sus ajustes de regresión en los objetos mencionados, y la simulación del modelo teórico presentado en el artículo.

En las Figuras 7.5, 7.6, 7.8 y 7.10 se muestra la comparación de la altura en su evolución temporal; se presenta la simulación del modelo teórico, puntos experimentales y ajustes a la réplica del dispositivo experimental, puntos experimentales y ajustes del Palo Volador de Joyabaj, Quiché, y puntos experimentales y ajuste al Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá.

Se puede observar que las Figuras 7.6, 7.8 y 7.10 tienen el mismo comportamiento, dado que siguen una función cuadrática cóncava hacia arriba y son caracterizados por ser monótonamente decrecientes. Nótese que el ajuste funciona en el rango en donde la parábola no es decreciente, para la réplica del dispositivo experimental es en  $[0, 40]$  segundos, en el Palo Volador en Joyabaj, Quiché es en  $[0, 250]$  segundos, en el Palo Volador en San Pedro La Laguna es  $[0, 200]$  segundos, esto se realizó para efectos de comparación más no de predicción. Asimismo, la simulación teórica en la Figura 7.5 también es caracterizado por ser monótonamente decreciente, identificando esta variable como una de sus principales coincidencias en su comportamiento.

El coeficiente cuadrático del ajuste tuvo un orden de magnitud en la réplica del dispositivo experimental de  $10^{-3}$  y en el Palo Volador de Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá de  $10^{-4}$ , indicando que a simple vista puede verse lineal, sin embargo, los datos presentan una curvatura y el gráfico de residuos en las Figuras 7.7, 7.9, 7.11 lo confirma al ser aleatorios alrededor de cero.

Además, en las Figuras 7.12, 7.13, 7.14 se presenta el diagrama de fase de la altura de la réplica del dispositivo experimental y del Palo Volador en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá. Las velocidades en los diagramas de fase decrecen linealmente a medida en que los bailarines y las esferas descienden del mástil. El artículo de referencia no presenta una simulación del diagrama de fase de la altura para hacer alguna comparación, sin embargo, se presenta como referencia para posibles futuras investigaciones.

En las Figuras 7.18, 7.19, 7.20 y 7.21 se presenta el diagrama de fase de la longitud de la cuerda, se hace la misma comparación entre los cuatro objetos mencionados. Sin embargo, se observan diferencias entre los datos experimentales y el modelo teórico. La simulación teórica en la Figura 7.18 tiene inicialmente un incremento en su velocidad desde aproximadamente  $44 \text{ cm/s}$  hasta  $54 \text{ cm/s}$  a medida en que la esfera desciende del mástil, sin embargo, los ajustes de los datos experimentales muestran lo contrario, por ejemplo, en la réplica del dispositivo experimental, en la Figura 7.19, la velocidad del conjunto de datos 5 empieza aproximadamente en  $14.5 \text{ cm/s}$  y decrece hasta  $5 \text{ cm/s}$ , además, en el Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en la Figura 7.20, la velocidad del conjunto de datos 3 empieza aproximadamente  $17.0 \text{ cm}$  y decrece hasta  $2.00 \text{ cm/s}$  a medida que los bailarines descienden; en San Pedro La Laguna, Sololá la velocidad empieza en  $15 \text{ cm/s}$  y finaliza en  $5 \text{ cm/s}$ .

La diferencia en la longitud de la cuerda, es decir, la variable  $\rho$  radica desde el comportamiento de la longitud de la cuerda en su evolución temporal. En las Figuras 7.24, 7.26 y 7.28 los datos experimentales muestran que tiene un ajuste cuadrático cóncava hacia abajo y son caracterizados por ser monótonamente crecientes, mientras que la simulación de la longitud tiene un comportamiento cóncavo hacia arriba como en la Figura 7.22. Nótese que el ajuste funciona en el rango en donde la parábola no es decreciente, para la réplica del dispositivo experimental es en  $[0, 27]$  segundos, en el Palo Volador en Joyabaj, Quiché es en  $[0, 250]$  segundos, en el Palo Volador en San Pedro La Laguna es  $[0, 200]$  segundos.

El modelo teórico no reproduce correctamente la evolución de la longitud de la cuerda al compararse con los datos de campo del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, en San Pedro La Laguna, Sololá y en la propia réplica de su dispositivo experimental en las condiciones estudiadas. Nótese que se observó que en la réplica del dispositivo experimental el hilo tiende a enredarse mientras las esferas giran alrededor del mástil. Se utilizó lubricante de silicón en los cojinetes para evitar la ralentización de su movimiento rotacional. Se desconoce la fricción de los cojinetes usados en el dispositivo experimental del artículo de referencia.

En las Figuras 7.33, 7.34, 7.36, 7.38 se encuentra la comparación del ángulo cenital en su evolución temporal, se hace la misma comparación entre los cuatro objetos mencionados con sus datos experimentales y sus respectivos ajustes. En la simulación del modelo teórico se observa que es monótonamente decreciente. No obstante, los datos experimentales muestran un incremento al inicio, por ejemplo, los datos del Palo Volador en la Figura 7.36, el conjunto de datos 3 empieza alrededor de  $0.375 \text{ rad}$  (21.5 grados sexagesimales) alcanzando su punto máximo absoluto aproximadamente en el segundo 25.0, llegando aproximadamente a los  $0.550 \text{ rad}$  (31.5 grados sexagesimales), luego decrece. Este comportamiento también se observa en la réplica del dispositivo experimental, el conjunto de datos 5 alcanza su máximo absoluto aproximadamente en  $0.600 \text{ rad}$  (37.2 grados sexagesimales), en el segundo 4.00, para posteriormente presentar un descenso.

Aparentemente el modelo teórico no considera el impulso inicial por dicha razón son diferentes al inicio. Nótese que en las gráficas del ángulo cenital en función del tiempo en las Figuras 7.34, 7.36, 7.38 se utilizó un ajuste cúbico en las regiones en donde sus extremos no divergen, para la réplica del dispositivo experimental es en  $[0, 17.0]$  segundos, en el Palo Volador en Joyabaj, Quiché es en  $[0, 216]$  segundos, en el Palo Volador en San Pedro La Laguna es  $[0, 220]$  segundos, esto se realizó para efectos de comparación más no de predicción.

En las Figuras 7.40, 7.41 y 7.42 se presenta el diagrama de fase del ángulo cenital de la réplica del dispositivo experimental, del Palo Volador en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá. En la Gráfica 7.40, se puede observar que la velocidad inicial del diagrama de fase 5 es alrededor de  $2.00 \times 10^{-1} m/s$ , y la velocidad decrece hasta la posición angular  $0.550 rad$  (31.5 grados sexagesimales), luego la velocidad incrementa nuevamente. Este comportamiento se puede observar en todos los diagramas de fase mencionados, excepto en el diagrama de fase de la Figura 7.42 dado que en el Palo Volador de San Pedro La Laguna, Sololá no se logró grabar todo el recorrido del bailarín. El artículo de referencia presenta el diagrama de fase del modelo teórico en la Figura 7.33 de una forma que no resulta adecuada para su análisis comparativo, sin embargo, se incluyen los diagramas mencionados como recurso para posibles desarrollos investigativos futuros.

En las Figuras 7.46, 7.47, 7.48 y 7.49 se presenta los dispositivos experimentales y los Palos Voladores en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá visto desde arriba. La toma de datos desde este ángulo se realizó para obtener datos para el ángulo azimutal.

En las Figuras 7.50, 7.51, 7.53 y 7.55 se presenta el diagrama de fase del ángulo azimutal, nuevamente se hace la misma comparación entre los cuatro objetos mencionados. El diagrama de fase de la simulación del modelo teórico en la Figura 7.50 es monótona decreciente y empieza aproximadamente con  $460 grad/s$ . El diagrama de fase de los datos experimentales de la réplica del dispositivo experimental en la Figura 7.51 alcanza su máximo absoluto en  $350 grados/s$ , posteriormente decrece con oscilaciones. Este comportamiento también lo tienen los diagramas de fase de los dos Palos Voladores en las Figuras 7.53 y 7.55, alcanzan su máximo absoluto en aproximadamente  $90.0 grados/s$  y  $100 grados/s$  luego decrecen con oscilaciones. Es decir, en cada vuelta existen diferentes velocidades angulares. La simulación del modelo teórico no reproduce las oscilaciones que tienen los datos experimentales.

Para el ángulo azimutal, se logró hacer la comparación del diagrama de fase directamente con los datos experimentales dado que se tomó desde otro ángulo, a diferencia del resto de variables que se tomaron datos de la parte lateral del Palo Volador, donde fue necesario el uso de ajustes para obtener las velocidades y diagramas de fase. Aun así, se trató de realizar ajustes para el ángulo azimutal, dada la forma peculiar que tienen los datos, se decidió utilizar regresión simbólica para encontrar una expresión que se ajuste a los datos experimentales, en las Figuras 7.57, 7.59 y 7.61 se puede observar el ajuste realizado con la expresión  $a * x + (b * x)/(x + c) + d$  que regresión simbólica encontró, estas tuvieron un coeficiente de regresión de  $R^2 = 0.999$ , sin embargo, en la gráfica de residuos de las Figuras 7.58, 7.60 y 7.62 se observan oscilaciones, indicando que la técnica de aprendizaje automático utilizado captura la evolución general de los datos, más no las oscilaciones presentes.

En las Figuras 7.52, 7.54, 7.56 se tienen los diagramas de fase obtenidas de los ajustes del ángulo azimutal, donde se observa que la velocidad decrece a medida en que se realizan vueltas alrededor del mástil.

Las oscilaciones mencionadas anteriormente provienen de que el dispositivo giratorio no es fijo al mástil en los Palos Voladores, en las grabaciones tomadas se puede observar que estas oscilan a medida en que los bailarines dan vueltas.

Las siguientes figuras se mencionan para mostrar el resto del conjunto de datos del ángulo azimutal en la réplica del dispositivo experimental y en los dos Palos Voladores, únicamente para mostrar que siguen el mismo comportamiento. En las Figuras 7.66, 7.68, 7.70, 7.72 se muestran otros conjuntos de datos del ángulo azimutal del Palo Volador en Joyabaj, Quiché con el análisis mencionado anteriormente. En las Figuras 7.74, 7.75, 7.76, 7.77 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, nuevamente con oscilaciones.

En las Figuras 7.80 y 7.82 se muestran otros conjuntos de datos del ángulo azimutal del dispositivo experimental, además en las Figuras 7.84 y 7.85 se tiene el diagrama de fase del ángulo azimutal de los datos experimentales de la réplica del dispositivo experimental, nuevamente con oscilaciones. Finalmente, en la Figura 7.88 se tiene otro conjunto de datos del ángulo azimutal en el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá, y en la Figura 7.90 se tiene el diagrama de fase de los datos experimentales de nuevo con oscilaciones.

En las Figuras 7.93, 7.95, 7.97 se encuentran el radio en su evolución temporal; se presentan los puntos experimentales y ajustes de la réplica del dispositivo experimental y de los dos Palos Voladores. El artículo de referencia no presenta una simulación del radio para hacer alguna comparación; sin embargo, se pretende únicamente mostrar su comportamiento para darle a futuros investigadores una referencia. La evolución del radio respecto al tiempo en el Palo Volador de Joyabaj, Quiché presenta un ajuste cúbico (funciona en  $[0, 120]$  segundos). Los datos alcanzan aproximadamente  $6.00 m$ , es inicialmente cóncava hacia abajo, luego tiene un punto de inflexión en el segundo 65.0 para ser cóncava hacia arriba; sin embargo, la réplica del dispositivo experimental presenta un ajuste cuadrático cóncava hacia abajo (funciona en  $[0, 17.5]$  segundos), su radio fue de aproximadamente  $0.800 m$ , además, el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá presenta un ajuste cuadrático cóncava hacia abajo (funciona en  $[0, 150]$  segundos), su radio fue aproximadamente de  $4.88 m$ . En las Figuras 7.94, 7.96 y 7.98 se tiene su respectivo gráfico de residuos indicando un ajuste adecuado.

En las Figuras 7.99, 7.100 y 7.101 se tiene el diagrama de fase del radio de la réplica del dispositivo experimental y de los dos Palos Voladores, se observa que, para la forma en que se tomaron los datos, la velocidad decrece a medida en que el radio crece. Nuevamente no se tiene medio de comparación, se presenta como referencia para futuras investigaciones.

Uno de los comportamientos peculiares que tuvo el radio se puede observar en el conjunto de datos 3 de la Figura 7.105, los puntos que se observan arriba del ajuste representan el lado derecho de la parte lateral del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, mientras que los puntos inferiores al ajuste representan el lado izquierdo de la parte lateral del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, indicando que el Palo Volador no es simétrico en los laterales. Esto no se observa en la Figura 7.95 dado que fue tomado desde otra posición diferente al conjunto de datos 1, 2 y 3 del radio.

En conclusión, existen tres principales comportamientos que el modelo teórico no predice en las mediciones hechas en este trabajo; el comportamiento de la longitud de la cuerda, el impulso inicial para el ángulo cenital y las oscilaciones que tiene la velocidad angular a medida que los bailarines/esferas descienden.

Después de esta comparación se investigó si es posible establecer una analogía entre el Palo Volador y la primera y segunda ley de Kepler. Para que la segunda ley de Kepler se cumpla el gráfico de área vs tiempo debería ser constante, lo cual no se observa en la Figura 7.109, esta gráfica tiene un comportamiento oscilatorio, es decir, se barren diferentes áreas en los mismos tiempos, dejándose de cumplir la segunda ley de Kepler en el Palo Volador de Chichicastenango, Quiché. En la Tabla 7.2 se tienen las incertidumbres de las áreas tomadas. También se verificó si la relación área-tiempo se cumple en el Palo Volador de Joyabaj, Quiché en la Figura 7.111, se observa que también tuvo un comportamiento oscilatorio, es decir, tampoco se cumple la segunda ley de Kepler.

En la Figura 7.110 se tiene una revolución vista desde el cenit para el Palo Volador de Chichicastenango, Quiché. Si se tratara de establecer una similitud con la primera ley de Kepler, la coordenada  $(0, 0)$  sería el Sol, y la trayectoria del bailarín sería la órbita de un planeta; sin embargo, aunque tenga una forma parecida a una elipse, es imposible afirmar que se cumpla la primera ley de Kepler por definición, dado que el Sol debería estar en uno de sus focos; el mismo resultado se tuvo para el Palo Volador de Joyabaj, Quiché en la Figura 7.112

En conclusión, la primera y segunda ley de Kepler no se cumplen con las mediciones hechas en el Palo Volador.

En la literatura encontrada, se expone que el Palo Volador tiene  $30.0\text{ m}$  de altura, sin embargo, el Palo Volador de Joyabaj, Quiché midió  $24.4\text{ m} \pm 0.01\text{ m}$ . Además, la literatura expone que el Palo Volador tiene 13 revoluciones, sin embargo, el Palo Volador de Joyabaj, Quiché tiene aproximadamente 27 revoluciones, el Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá tiene aproximadamente 25 revoluciones y el Palo Volador en Chichicastenango, Quiché tiene aproximadamente 19 revoluciones.

Se logró documentar el rito del Palo Volador en diferentes lugares de Guatemala, especialmente se hace mención al Palo Volador de San Pedro La Laguna, Sololá, donde la danza fue retomada el 29 de Julio del 2025 después de 80 años sin ser celebrada, marcando un hito en el rescate de danzas tradicionales.

En las mediciones hechas en este trabajo se contó principalmente con error sistemático por paralaje, dado que el tamaño del Palo Volador se presta a la generación de este error.

Se aclara que la construcción de la réplica se realizó con el fin de presentar los datos experimentales de la misma, dado que el artículo original no se publicaron datos experimentales adicionales a las variables estudiadas, cubriendo así el vacío presentado en el estudio previo. Nótese que el objetivo de este trabajo no fue validar el modelo teórico; se realizó con motivos de comparar sus predicciones y el grado de concordancia entre las variables de estudio, dado que el modelo se encuentra en condiciones idealizadas que este experimento no sigue; por ejemplo, no se considera la fricción del hilo al desenredarse, además de la fricción de los cojinetes relacionado al movimiento rotacional.

En los resultados se presentaba 3 de los 30 conjuntos de datos de la réplica del dispositivo experimental, en apéndice B se encuentran los ajustes individuales de los 30 conjunto de datos, en apéndice A se presentan los datos brutos de la réplica del dispositivo experimental, además, en apéndice C, D y E se presentan los datos brutos de los conjuntos de datos de los Palos Voladores estudiados y en apéndice G los ajustes. Se mostraron los datos más representativos con el fin de resaltar tendencias principales.

- Se logró hacer la comparación entre la simulación del modelo teórico propuesto en el artículo *Physics in Traditions: the ritual of the owners of the Mexican sky*, para la altura en su evolución temporal  $z(t)$  en la réplica del dispositivo experimental y los Palos Voladores en Joyabaj, Quiché y en San Pedro La Laguna, Sololá. Identificando esta variable como una de sus principales coincidencias en su comportamiento.
- Se hizo la comparación entre la simulación del modelo teórico y el diagrama de fase de la longitud de la cuerda ( $\dot{\rho}$  vs  $\rho$ ) en los objetos estudiados. Identificando esta variable como una de sus principales diferencias, dado que los datos experimentales de la longitud en función del tiempo  $\rho(t)$  siguen una función cuadrática monótona creciente cóncava hacia abajo, mientras que la concavidad teórica es hacia arriba.
- Se hizo la comparación entre la simulación del modelo teórico y el ángulo cenital en su evolución temporal  $\theta(t)$ . Identificando que el modelo teórico no considera el impulso inicial de los bailarines y de la esfera analizada.
- Se hizo la comparación entre la simulación del modelo teórico y el diagrama de fase del ángulo azimutal ( $\dot{\varphi}$  vs  $\varphi$ ). Identificando que el modelo teórico no considera las oscilaciones que esta variable tiene.
- Se presentan los datos del radio  $r$  con el fin de tenerlo como recurso para posibles futuras investigaciones.
- Se investigó que no es posible establecer una analogía entre el Palo Volador de Joyabaj, Quiché y el Palo Volador de Chichicastenango, Quiché con las leyes descritas por la primera ley de Kepler y segunda ley de Kepler.

- Se recomienda, el uso de más cámaras en las partes laterales del Palo Volador, por ejemplo, cámaras ubicadas en direcciones ortogonales entre sí, esto permitiría obtener proyecciones independientes y consecuentemente lograr tener más datos para su análisis. Alternativamente, se podría tratar de utilizar sensores que permitan recrear el movimiento tridimensional completo, como giroscopios o acelerómetros que estén incorporados a la esfera/bailarín.
- Para la construcción del mástil del dispositivo experimental, se recomienda que tenga un diámetro mínimo de aproximadamente  $3\text{ cm}$ , esto mejora la estabilidad durante el giro de las esferas. Asimismo, la base del mástil debe contar con un peso que garantice la firmeza del sistema para evitar movimientos indeseados durante la ejecución del experimento.
- Para futuras investigaciones que deseen realizar un modelo analítico, se recomienda considerar las principales discrepancias que tuvieron los datos experimentales y el modelo teórico del artículo de referencia. Se podría utilizar para tratar de refinar el modelo existente, o bien, investigar nuevas formas de planteamiento que describan de mejor forma el objeto estudiado.

- Bartle, R., y Sherbert, D. (2010). *Introduction to real analysis*. John Wiley and Sons, Inc.
- Canassa, T., Freitas, W., Ferreira, J., y Goncalves, A. (2019). Spherical pendulum as an analogy to kepler's second law. *Physics Education*.
- Comadira, N. (1996). *Danza de los voladores*. Universidad veracruzana.
- Cranmer, M. (2023). *Pysr: High-performance symbolic regression in python and julia*. Descargado de <https://github.com/MilesCranmer/PySR?tab=readme-ov-file>
- Espíndola, R., Del Valle, G., Hernández, G., Muciño, D., Guijosa, S., Jiménez, J. L., y Campos, I. (2019). Physics in traditions: the ritual of the owners of the mexican sky. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Gall, F. (1978). *Diccionario geográfico de guatemala tomo i*. Compilación crítica.
- Gall, F. (1981). *Diccionario geográfico de guatemala tomo ii*. Compilación crítica.
- Gall, F. (1983). *Diccionario geográfico de guatemala tomo iii*. Compilación crítica.
- García, C. (1989). *Tradiciones de guatemala*. Descargado de <https://revistasceceg.usac.edu.gt/detallearticulo.php?c=60&a=392>
- Hurtado, N. (1969). *Tradiciones y ferias mexicanas*. Editorial del Valle de México.
- Jaúregui, J. (2010). Una comparación estructural del ritual del volador. *Escritos. Revista del Centro de Ciencias del Lenguaje*, 141-219.
- MIT. (2014). *Keplers law*. Descargado de [https://math.mit.edu/~dunkel/Teach/18.354\\_2014S/lecture\\_notes/L01\\_kepler.pdf](https://math.mit.edu/~dunkel/Teach/18.354_2014S/lecture_notes/L01_kepler.pdf)
- Morín, D. (2007). *The lagrangian method*. Descargado de <https://scholar.harvard.edu/files/david-morin/files/cmchap6.pdf>
- Nájera, M. (2008). El rito del palo volador: encuentro de significados. *Revista Española de Antropología Americana*.
- Quan, N. (2025). *El retorno del vuelo: San pedro la laguna recibe la tradición del palo volador*. Descargado de <https://prensacomunitaria.org/2025/07/el-retorno-del-vuelo-san-pedro-la-laguna-recibe-la-tradicion-del-palo-volador/>
- Recinos, A. (1993). *Popol vuh las antiguas historias del quiché*. Fondo de cultura Económica México.
- Retif, R. (2013). *Los voladores de papantla en el cálculo*. Descargado de [https://prezi.com/wepy\\_i0wrxxh/los-voladores-de-papantla-en-el-calculo/#:~:text=La%20f%C3%ADsica%20en%20los%20Voladores%20de%20Papantla&text=La%20danza%20de%20los%20voladores,%2C%20fuego%2C%20cielo%20y%20tierra.](https://prezi.com/wepy_i0wrxxh/los-voladores-de-papantla-en-el-calculo/#:~:text=La%20f%C3%ADsica%20en%20los%20Voladores%20de%20Papantla&text=La%20danza%20de%20los%20voladores,%2C%20fuego%2C%20cielo%20y%20tierra.)

- Thornton, S. T., y Marion, J. B. (2004). *Classical dynamics of particles and systems*. Cengage Learning.
- UNESCO. (2009). *Ceremonia ritual de los voladores*. Descargado de <https://ich.unesco.org/en/RL/ritual-ceremony-of-the-voladores-00175?RL=00175>
- Vela, E., y Prieto, D. (2019). *La danza de los voladores patrimonio de la humanidad*. Editorial Raíces México.

Datos de la réplica del dispositivo experimental

Datos brutos de la réplica del dispositivo experimental <https://docs.google.com/spreadsheets/d/11BdcHvsrgS5r8ncTfRkKbChyy1IuyKYGy/edit?usp=sharing&oid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true>

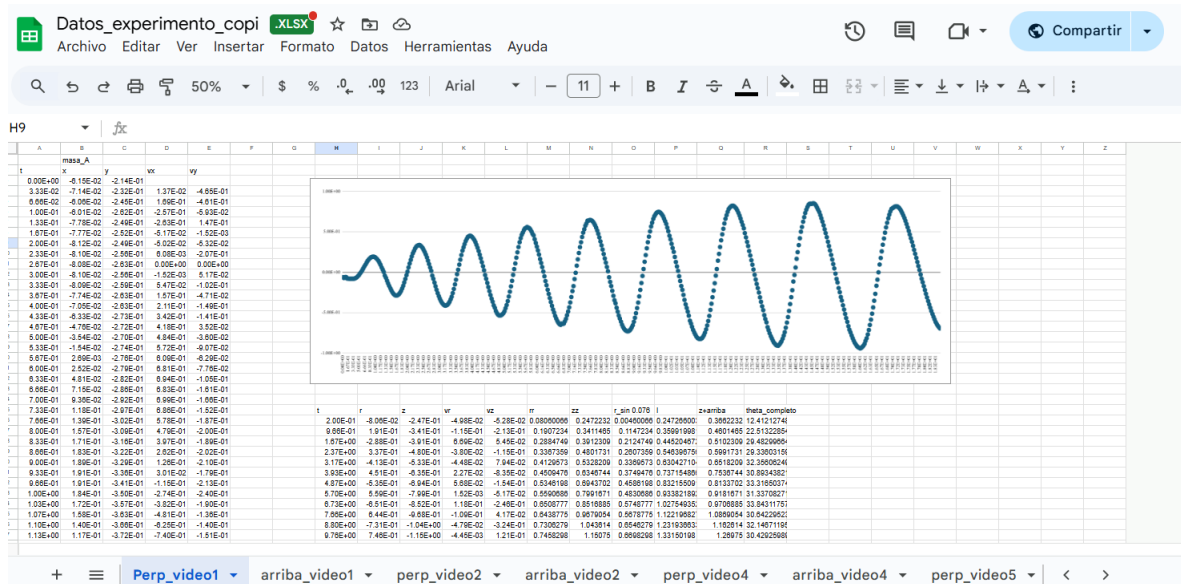


Figura A.1: Datos brutos de 30 datos tabulados en Excel

---

## Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental

---

Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental para la esfera 1

<https://docs.google.com/document/d/1YbsB7r0h57xB7CD6XYqNEuxESJB950Mp/edit?usp=sharing&oid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true> documento en docs

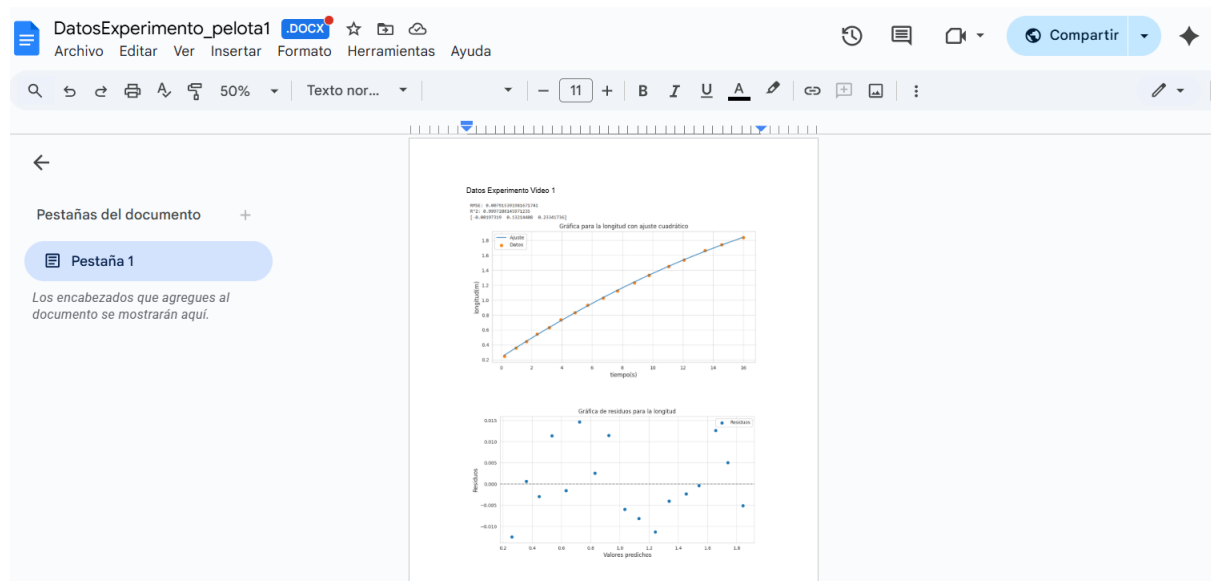


Figura B.1: Ajustes del dispositivo experimental para cada variable

---

## Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental

---

Ajustes de los datos de la réplica del dispositivo experimental para la esfera 2

[https://docs.google.com/document/d/16qxjLFMxAi4Hn5Zxxnw0Ga4SbNSpHQBz/edit?usp=drive\\_link&oid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/document/d/16qxjLFMxAi4Hn5Zxxnw0Ga4SbNSpHQBz/edit?usp=drive_link&oid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true)

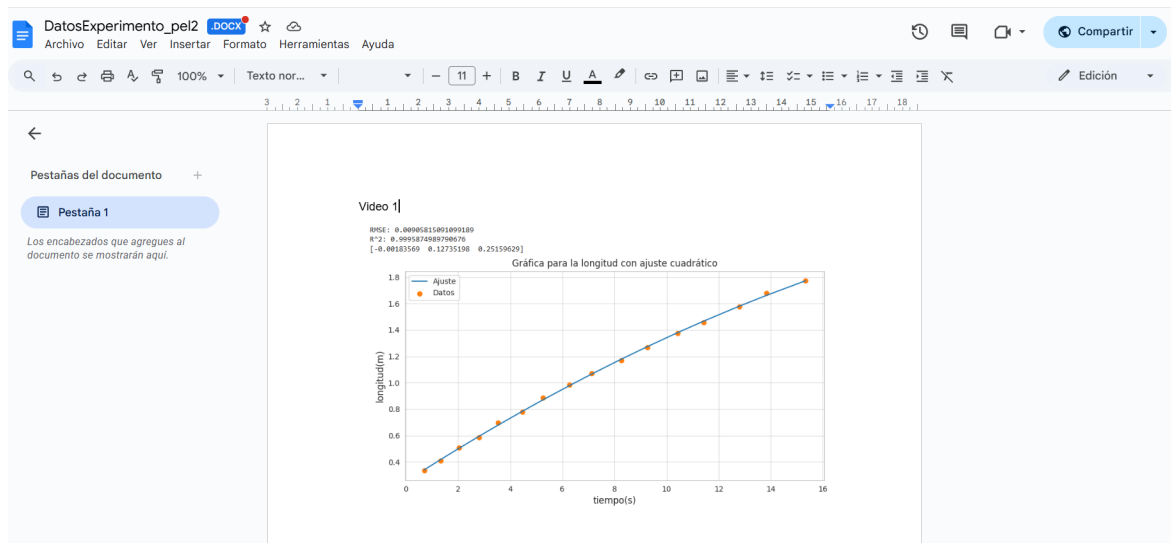


Figura C.1: Ajustes del dispositivo experimental para cada variable

Datos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

Datos brutos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1X1VEL5rcSxWtDk1YFiiAJc816B4b8fMx/edit?usp=sharing&ouid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true>

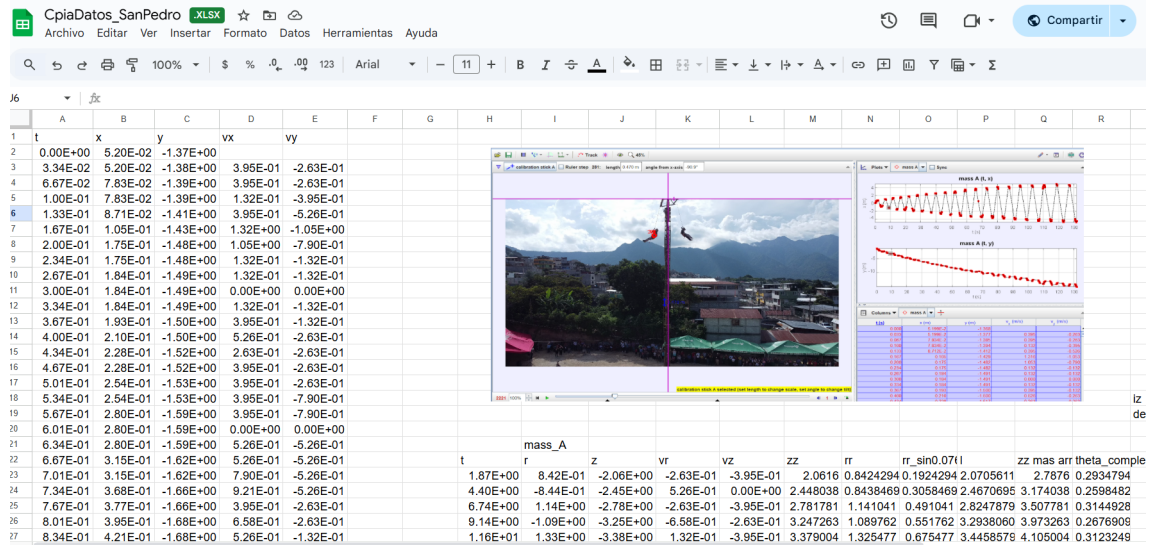


Figura D.1: Datos brutos del Palo Volador en San Pedro La Laguna, Sololá

## Datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché, visto desde arriba

Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vBIeUwnKCArS7jNpwjUBwtBjIuIckMrt/edit?usp=sharing&ouid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true>

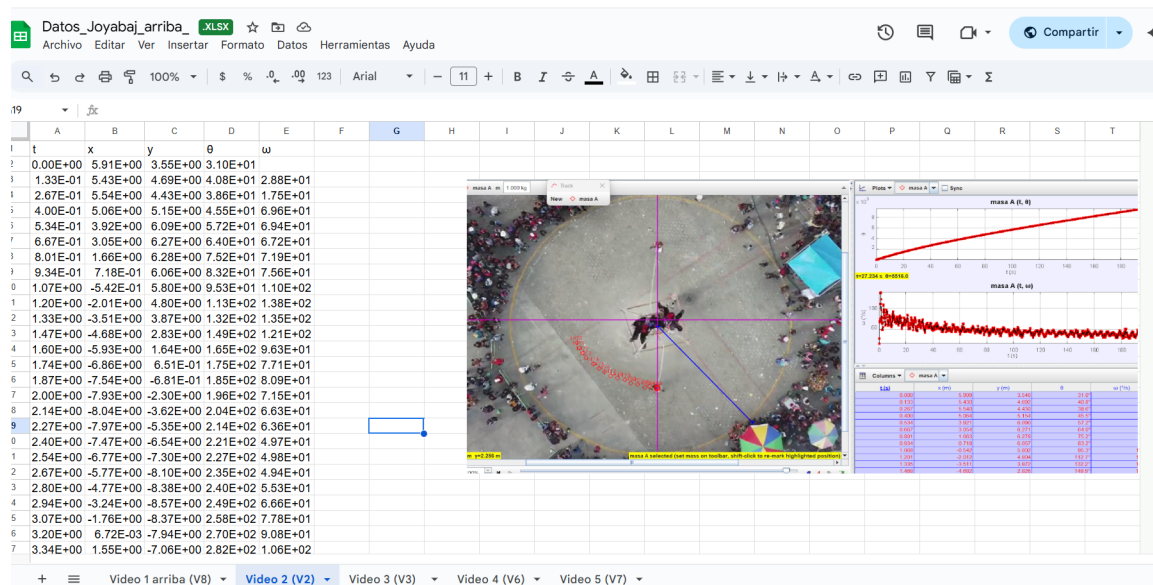


Figura E.1: Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché visto desde arriba

Datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1k4naGufpT61fxHwRN\\_R042eQxcCLsCjj/edit?usp=sharing&ouid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1k4naGufpT61fxHwRN_R042eQxcCLsCjj/edit?usp=sharing&ouid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true)

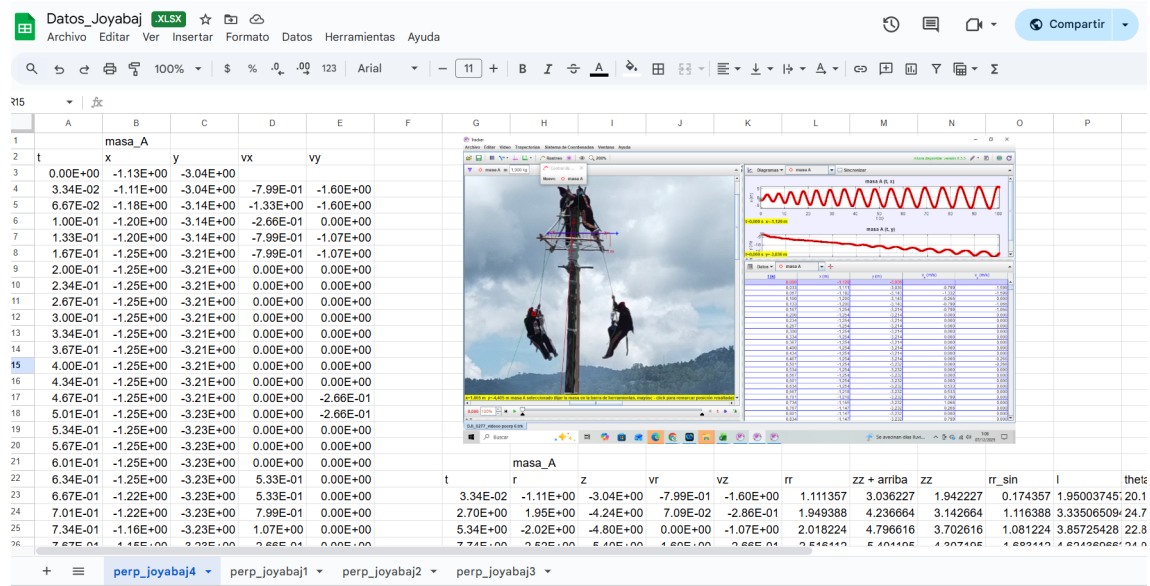


Figura F.1: Datos brutos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché desde el lado lateral

---

## Ajustes de los datos del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

---

Ajustes del Palo Volador en Joyabaj, Quiché

<https://docs.google.com/document/d/171MnGAQt9Z81J3iNWdvJiA5tiFC1vlft/edit?usp=sharing&ouid=102737254065982153399&rtpof=true&sd=true>

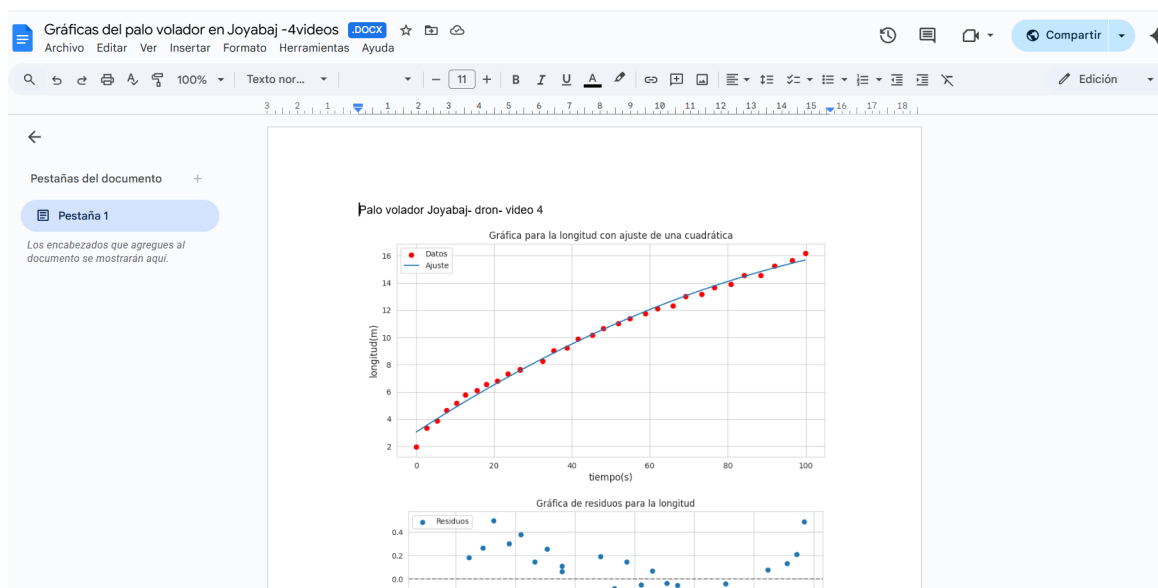


Figura G.1: Ajustes del Palo Volador en Joyabaj, Quiché desde el lado lateral

---

## Descripción de los municipios

---

### Chichicastenango, Quiché

Chichicastenango. Municipio del departamento de Quiché. Tiene un área aproximada de 400 km cuadrados. Durante el periodo hispánico y en épocas relativamente recientes la cabecera se conoció como Santo Tomas Chichicastenango. Se conocía como Chuilá o Chugüilá, el cual significa sobre los chichicastes, o lugar de las ortigas. Chichicastenango constituye un núcleo de indígenas quiches el cual se mantuvo durante los trescientos años del periodo hispánico. Actualmente es una de las comunidades más industrializadas en Guatemala. Los extranjeros son atraídos por su belleza natural y las costumbres ancestrales que los habitantes practican. Asimismo, la mayoría de los habitantes se dedican a la agricultura. El tejido de telas típicas también tiene gran aceptación entre los turistas. En el seno de su comunidad, los templos del periodo prehispánico se veneran imágenes católicas. Los ritos ancestrales son conservados y practicados y aún se realizan cultos propios. Una de las mayores atracciones de Chichicastenango es su iglesia del periodo prehispánico construida en el signo XVI. En los cerros Pocojil, y en el cerro Pascualabaj, se acostumbra la realización de ciertos ritos frente al ídolo que se encuentra en dichos lugares.

La fiesta titular en honor al patrón, Santo Tomás, se celebra durante la tercera semana del mes de diciembre, siendo el 21 el día principal. Han sido tradicionales los bailes folklóricos del Palo Volador, de La Conquista, El Toro y El Venado (Gall, 1978).

### Joyabaj, Quiché

Joyabaj, municipio del departamento del Quiché. Cuenta con un área aproximada de 304 km cuadrados. Durante el período indígena se conoció a su cabecera como Xoyabah o Chuixoyabah. En dicho lugar existe una laguneta, por el que se ha especulado que la etimología Joyabaj pudiese provenir de choy = laguna y abaj = piedra, o bien xol = entre y abaj, al ser muy pedregoso.

Se menciona que el fraile Tomás Gage llegó a Guatemala por septiembre de 1625, describe que los indígenas hacen de su lana de algodón muchas mantas, tienen abundancia de miel y grandes rebaños de cabras y maíz. Joyabaj se declaró monumento nacional precolombino por acuerdo gubernamental del 24 de abril 1931.

La feria titular se celebra del 10 al 15 de agosto. Acostumbran los siguientes bailes folklóricos San Miguel o Palo Volador, de La Conquista, Moros y Cristianos, El Morito, El venado, El Negro y La Culebra (Gall, 1981).

San Pedro La Laguna, Sololá

San Pedro La Laguna. Municipio del departamento de Sololá. Tiene un área aproximada de 24 km cuadrados. Los habitantes son comerciantes activos, elaboran lazos, jabón y algunos tejidos en los telares primitivos de palos, se ocupan en agricultura con especialidad en garbanzos, aunque los sampedranos también han vendido tomates, cebolla, aguacate, entre otros. Asimismo, se dedican a la pesca. El idioma predominante es el cakchiquel. También fue llamado Chi Tzunún Choy, que traducido significa laguna de los gorriones.

Benjamin D. Paul estudió la comunidad y menciona, en cuanto a su indumentaria, si bien los pantalones aborígenes eran cortos y cubrían parte de las piernas, debido a la aculturización, el resto de traje es de estilo ladino. Además, en la introducción del agua potable, las mujeres ya no descendían al lago para llenar sus tinajas, sino que los toman de grifos.

El día principal de la feria titular del patrono es el 20 de junio, donde la iglesia conmemora al Apóstol San Pedro (Gall, 1983).

---

Mapa general con los municipios de los Palos Voladores

---

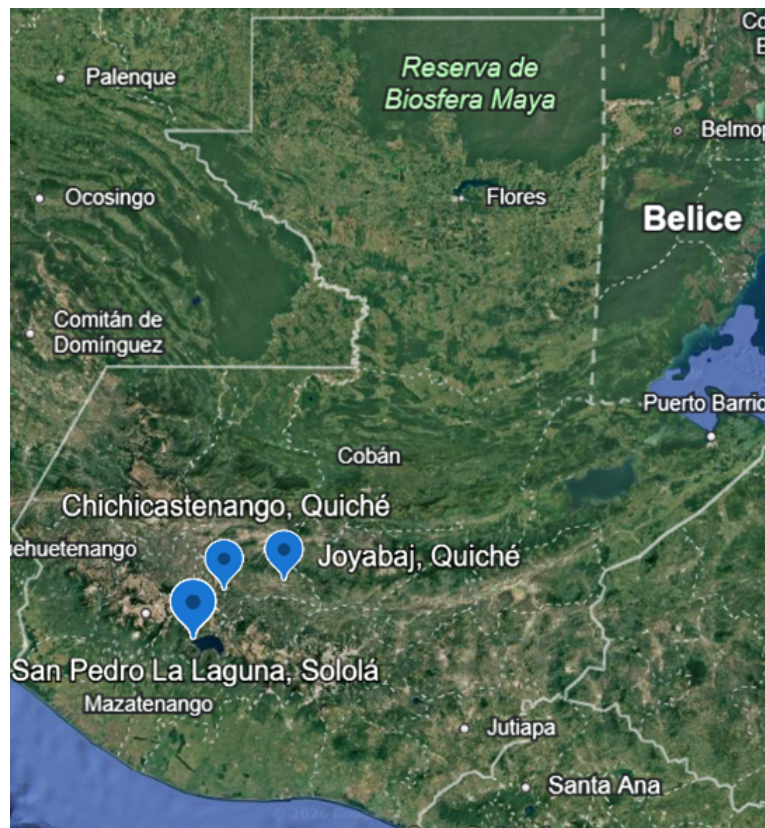


Figura I.1: Mapa general con las locaciones de los Palos Voladores estudiados