



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la Biomecánica en el Salto con Garrocha

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero en Sistemas Biomédicos

P R E S E N T A

Eduardo Josue Piña Rojas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Lázaro Morales Acosta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS DE LA BIOMECAÁNICA EN EL SALTO CON GARROCHA que presenté para obtener el título de INGENIERO EN SISTEMAS BIOMÉDICOS es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

EDUARDO JOSUE PIÑA ROJAS
Número de cuenta: 317020618

Agradecimientos

Mis más grandes agradecimientos a mi familia, por el apoyo, paciencia y cariño que me brindaron durante toda la carrera, son una parte fundamental de mi desarrollo como profesionista y como persona. A mis padres, especialmente por estar al pendiente de mi en todo momento, por brindarme esa confianza que a veces me falta y por guiarme en el camino de la vida. A mi hermana, por ser mi refugio incondicional y por pasar los momentos mas divertidos que he vivido.

Gracias al Dr. Lázaro Morales Acosta por apoyarme desde el primer momento en este trabajo, gracias por todos los consejos, tiempo y recursos que me brindo para la realización del trabajo, por guiarme no solo en el desarrollo académico, sino que también en el desarrollo personal.

Gracias a la entrenadora Irma Corral por brindarme su apoyo, consejos y tiempo, fundamentales para este trabajo, especialmente quiero agradecer porque me ayudo en mi desarrollo académico, deportivo y personal.

Gracias al Dr. Jorge Takeshi Aoyama Núñez por el apoyo y accesibilidad de los recursos brindado, al igual que el tiempo y consejos aportados para una mejor realización del trabajo.

Gracias a Raysa por darme ánimos, brindarme su apoyo y estar al pendiente de cada detalle, durante todo este tiempo.

Con todo mi corazón, gracias.....

También quisiera dar un agradecimiento a la Subdirección de Producción Audiovisual de la DGDC de la UNAM, quien apoyó en las grabaciones en cámara lenta.

Se agradece a la DGAPA por apoyo indirecto recibido por medio del proyecto PAPIIT IT102724 y por el proyecto PE110124. Lo que permitió diseñar accesorios y acoplar parte del Hardware utilizado.

Índice

Capítulo 1 - Introducción.....	1
Historia del Salto con Garrocha.....	2
Zona de Salto.....	4
Definición del Problema.....	4
Hipótesis.....	4
Objetivo.....	5
Justificación.....	5
Delimitaciones y Limitaciones.....	5
Capítulo 2 - Marco Teórico.....	6
Técnica de Salto con Garrocha.....	6
Fases del Salto.....	10
Biomecánica.....	12
Bases y Fundamentos del Movimiento Humano.....	12
Análisis del Movimiento.....	25
Modelos Biomecánicos del Cuerpo Humano.....	26
Biomecánica Deportiva.....	27
Biomecánica en el Salto con Garrocha.....	27
Antecedentes.....	27
Variables Biomecánicas.....	28
Técnicas de análisis.....	31
Fotogrametría Secuencial.....	46
Capítulo 3 - Metodología.....	49
Grupo de Estudio.....	49
Instrumentación.....	50
Modelo del Cuerpo Humano.....	51
Procedimientos.....	52
Procesamiento de Datos.....	53
Capítulo 4 – Análisis de datos.....	55
Normalización De Muestras.....	56
Factores de Rendimiento.....	56
Últimos Tres Pasos.....	56
Despegue.....	58
Velocidad y Aceleración Lineal CM.....	58

Capítulo 5 – Resultados.....	60
Tiempo Gesto Motor	60
Últimos Tres Pasos	61
Despegue	71
Correlaciones Variable de Rendimiento.....	75
Trayectorias Gesto Motor.....	77
Velocidad Gesto Motor	78
Capítulo 6 – Discusión	81
Discusión de resultados	81
Tiempo Gesto Motor	81
Últimos Tres Pasos	81
Despegue	83
Correlaciones Variable de Rendimiento.....	85
Trayectoria y Velocidad del Gesto Motor	87
Limitaciones	88
Investigaciones Futuras	89
Capítulo 7 - Conclusiones.....	90
Bibliografía.....	91
Apéndice A.....	93
Zona de Salto	93
Pasillo de Carrera (Carril).....	93
Cajetín.....	93
Saltómetros (Postes)	94
Zona de Caída.....	95
Pértigas (Garrochas)	95

Capítulo 1 - Introducción

El ser humano siempre ha tenido la necesidad de moverse, necesidades tan sencillas de supervivencia como la caza, han forzado al hombre a tener actividad física. Posteriormente con la ambición y la competitividad que caracteriza al ser humano se empezó a medir entre ellos las distintas habilidades, como fuerza, velocidad y salto. El deporte parte de este concepto de actividad física y de la competitividad del ser humano, existen actualmente diferentes deportes. Se puede clasificar el deporte en dos grandes ramas: los individuales y los colectivos, de estas ramas derivan otras clasificaciones, pero siempre es con el objetivo de superar al rival. En los deportes individuales destacan deportes de combate, precisión, estéticos, de tiempo y marca, etc.

El atletismo es un deporte que se considera de tiempo y marca, tiene diversas disciplinas. Principalmente se dividen en dos ramas, pista y campo. En la pista se realizan las pruebas de carreras como lo son velocidad, fondo y vallas. En el campo se encuentran los saltos y los lanzamientos. Los lanzamientos existen tres pruebas las cuales son jabalina, disco y martillo. En los saltos están los saltos horizontales cuya meta es recorrer la máxima distancia horizontal posible (salto de longitud y salto triple) y por otro lado están los saltos verticales, el propósito de los saltos verticales es saltar la máxima altura posible (salto de altura y salto con garrocha).

El evento de salto con garrocha se realiza de la siguiente forma: Primero los participantes establecen una altura donde se va a colocar una varilla para comenzar a saltar, eligen una progresión mediante la cual la varilla va a ir subiendo; normalmente es de 10 cm en 10 cm; y por último cada atleta decide si inicia a saltar en la altura donde se estableció como primera altura o se incorpora en alguna otra altura según la progresión decidida. Después de haber decidido la altura inicial, la progresión y cada atleta haya establecido en que altura va a comenzar a saltar, da comienzo la competencia. Los participantes tienen un orden específico para saltar y cada atleta tiene tres intentos para superar la altura en la que se encuentre la varilla, una vez que todos los saltadores que comenzaron en la altura inicial hayan realizado un salto exitoso o hayan fallado sus tres intentos, se sube la altura de la varilla y los participantes que no lograron superar la altura anterior quedan eliminados de la competencia. El ganador de la prueba es aquel atleta que logre superar la mayor altura.

Para los saltos los atletas pueden usar cualquier garrocha que cumpla con los requisitos establecidos, puede correr la distancia que el atleta quiera y puede agarrarse de la garrocha en cualquier lugar. Un salto se considera válido cuando el atleta pasa por encima de la varilla sin tirarla, cumpliendo con la técnica específica de salto con garrocha (despegar con un pie y no agarrar la pértiga arriba del agarre de la mano superior después del despegue). En la figura 1.1 se presentan fotografías del evento salto con garrocha.



Figura 1.1 – Secuencia de Fotos del Evento Salto con Garrocha

Historia del Salto con Garrocha

El salto con pértiga también conocido como salto con garrocha, tiene un origen muy antiguo, civilizaciones como los griegos, celtas y cretenses practicaban este deporte. Hay evidencia en donde en la antigua Grecia, se realizaban competencias con garrochas con el objetivo era recorrer la mayor distancia posible, se llegaron a utilizar palos largos como garrochas durante asedios en tiempos de guerras para saltar las murallas de los enemigos, incluso existe evidencia donde se celebraban espectáculos en la cual personas saltaban toros o caballos con ayuda de varas largas. En los Países Bajos y el Reino Unido, usaban como medio de transporte postes de madera para poder saltar sobre canales y zonas pantanosas, evitando recorrer distancias hasta el puente más cercano o a un camino firme. En Venecia los gondoleros solían utilizar este método para subir y bajar de sus embarcaciones en algunas ocasiones.

El origen del salto con garrocha como lo conocemos actualmente se remonta a Europa en el siglo XIX. En Lancashire, Inglaterra 1843, se tiene registro de la primera competición basada en la altura alcanzada y fue hasta la década de 1850 en Alemania donde este deporte fue adoptado por una asociación de gimnasia, se utilizaban pértigas de fresno o nogal con puntas de hierro para mayor estabilidad.

Las primeras garrochas en competencias fueron de madera, este material casi no permitía la flexión del implemento, en ese momento la técnica de salto que se practicaba era la de trepar, consistía en clavar en el suelo la garrocha y trepar en ella mientras se realizaba el movimiento hacia la marca de altura. Fue hasta 1889, que se prohibió esta técnica de salto por las lesiones que conllevaba.

En 1857 se tiene el primer registro del uso de una garrocha de bambú, se empezó a utilizar este material ya que era menos pesada que la madera y más flexible, esta flexibilidad generaba un impulso extra al saltador. Gracias a esta flexibilidad se cambió la técnica que se usaba de trepar a una nueva técnica denominada columpio, la cual permitió superar los 4 metros de altura. Esta técnica de columpio es el predecesor de la técnica usada actualmente.

Las garrochas de bambú y la introducción de una caja en la base donde se planta la garrocha permitieron alcanzar nuevas alturas, para 1942 el récord ya se encontraba en 4.77 metros, sin embargo, el bambú seguía siendo frágil lo cual provocaba una curvatura escasa ya que si se llegaba a exceder cierto punto de flexión se rompía. En la década de 1940, los

atletas empezaron a utilizar pértigas de acero y aluminio. Alrededor de 1960, las pértigas de fibra de vidrio y carbono, que son las que se utilizan actualmente, se comenzaron a utilizar y fueron ganando popularidad debido a su flexibilidad, resistencia, peso y su capacidad de almacenar energía.

La barrera de los 5 metros de altura se superó en 1963 gracias a las propiedades antes mencionadas de los nuevos materiales utilizados en las pértigas, pero no solo se debió a esto, un factor importante fue la incorporación de los colchones de espuma en la década de 1960. Antes de los colchones de espuma los saltadores caían directamente al suelo, conforme fue incrementando la altura, el impacto era mayor. Se empezó a intentar amortiguar por las lesiones que se provocaban, especialmente en las articulaciones, antes de las colchonetas se provo a incorporar arena o virutas para amortiguar, a pesar de esto no era suficiente por lo tanto se terminó cambiando por colchonetas.

Esta evolución en la zona de aterrizaje permitió que los atletas tuvieran más libertad al momento de caer y provoco que pudieran aterrizar de diferentes formas sin sufrir lesiones. Todos estos cambios, en los materiales de la garrocha y la zona de aterrizaje permitieron que la propia técnica de ejecutar el salto fuera modificada con el objetivo de superar la máxima altura. Se sobrepaso la altura de 6 metros por primera vez en 1985, por el saltador Ucrania no Serguéi Bubka y actualmente el récord mundial lo tiene un atleta sueco Armand Duplantis en 6.30 metros establecido en 2025.

Se introdujo el salto con garrocha en los juegos olímpicos desde 1896 para los hombres y fue hasta el año 2000 que se realizaron competencias de esta disciplina en la rama femenil. [1, 2, 3, 4, 5]

En la figura 1.2, se muestra una línea del tiempo donde se sintetizan los hitos mas importantes del salto con garrocha.

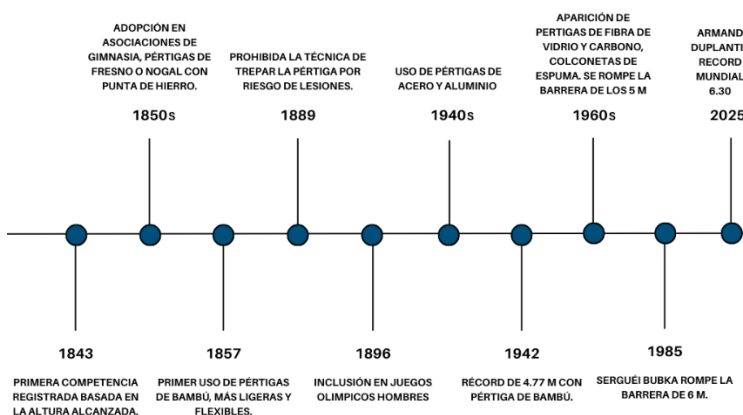


Figura 1.2 - Línea del Tiempo: Historia del Salto con Pértiga

Zona de Salto

Lo que se denomina zona del salto consta del carril, el cajetín, los postes y la zona de caída. En la figura 1.3 se enumeran las partes que conforman la zona de salto. Cada una de estas partes es fundamental en cualquier competencia de salto con garrocha y existen unos estándares que se deben de cumplir para poder hacer oficial una competencia. [6] Para profundizar más en las características de cada elemento consultar el Apéndice A.



Figura 1.3 - Zona de Salto con Pértiga. Carril (1), Cajetín (2), Postes (3), Zona de caída (4).
ver apéndice A

Definición del Problema

El salto con garrocha es una prueba del atletismo que demanda bastante habilidad física ya que a diferencia de otras pruebas se aplica fuerza en todo el cuerpo, en la carrera y el despegue predominan la fuerza en los miembros inferiores y en la fase de apoyo en la garrocha predomina la fuerza en los miembros superiores. Este salto tiene una de las técnicas más complejas, lo cual convierte a esta prueba una de las más desafiantes de analizar del atletismo. Se han realizado estudios intentando modelar el salto dividiéndolo en diferentes etapas y a pesar de que esta prueba se incluyó en los juegos olímpicos desde 1896, existe una falta de comprensión sobre las características específicas del gesto motor involucrado en este deporte, ya que la ejecución del salto no solamente es lineal, sino que interviene una fuerza que convierte la energía cinética que lleva el atleta en energía potencial. Este cambio de energía lo realiza el implemento llamado garrocha. La insuficiente caracterización y comprensión del gesto motor de este salto puede llevar a una ineficiencia en la ejecución, limitando el rendimiento de los atletas.

Hipótesis

Si se analizan mediante fotogrametría secuencial los ángulos articulares de rodilla, cadera, tobillo, codo, hombro y muñeca, así como las velocidades segmentarias, el desplazamiento del centro de gravedad y el tiempo de ejecución de cada fase en las últimas tres zancadas y en la primera fase de apoyo en la garrocha, entonces será posible identificar los patrones biomecánicos que optimizan la transferencia de energía y la eficiencia del gesto motor en el salto con garrocha.

La rodilla, cadera y tobillo del lado derecho durante la primera fase de apoyo en la garrocha, tienen gran influencia en la eficiencia del salto con garrocha.

Una correcta alineación entre la muñeca, codo, hombro y cadera optimizan la transferencia de energía y la eficiencia del salto con garrocha.

Objetivo

Analizar mediante fotogrametría los ángulos articulares, las velocidades segmentarias, el desplazamiento del centro de gravedad y el tiempo de ejecución en las últimas tres zancadas y en la primera fase de apoyo de la pértiga, con el fin de identificar patrones biomecánicos que influyen en la eficiencia del gesto motor en el salto con garrocha.

Justificación

El salto con garrocha es una de las pruebas más complejas del atletismo, ya que integra aspectos técnicos, físicos y biomecánicos que influyen en el rendimiento del atleta. La correcta ejecución requiere de una coordinación precisa de las extremidades, un gran control del atleta con su cuerpo y una adecuada transferencia de energía durante las fases de carrera, despegue y apoyo en la garrocha.

Realizar un análisis biomecánico por medio fotogrametría permite estudiar de manera objetiva variables clave como los ángulos articulares, el desplazamiento y el tiempo. Estas mediciones facilitan la comprensión del gesto motor que permitirá identificar patrones asociados con la eficiencia del evento.

La importancia del estudio detallado de estas variables no solo contribuye al ámbito académico y científico de la biomecánica, sino que igualmente tiene aplicaciones prácticas en el entrenamiento deportivo, ya que ofrece herramientas para optimizar la técnica de los atletas y reducir el riesgo de lesiones.

Delimitaciones y Limitaciones

El estudio se delimita a los mejores atletas estudiantes de salto con garrocha participantes en el Campeonato Nacional de Universidades 2025, del 8 al 10 de mayo de 2025. La obtención de datos es exclusivamente durante la competencia, sin sesiones previas o posteriores. El análisis se basará únicamente en filmaciones tomadas de los intentos de salto realizados en el evento.

Las grabaciones se realizarán durante la competencia, lo cual no se tendrá control de cuando el atleta decida saltar. Esto ocasiona pérdida de algunas muestras debido al tiempo con la que se toman los videos y se guardan. Condiciones externas no controladas como iluminación o atletas/personal técnico del evento puede que sin querer interferieran con las filmaciones.

Capítulo 2 - Marco Teórico

Técnica de Salto con Garrocha

La técnica del salto con garrocha como se comentó anteriormente en sus principios cuando se usaban garrochas de madera y no tenían casi flexibilidad se utilizaba la técnica de trepar, se clavaba la garrocha y se trepaba lo más alto que el atleta lograra antes de llegar a la marca de la altura. La incorporación de las garrochas de bambú y su flexibilidad propiciaron las condiciones para una nueva técnica denominada columpio que es el predecesor de la técnica actual, consistía en clavar la garrocha y colgarse de ella, su flexibilidad permitía que el atleta se pudiera agarrar más alto de la garrocha y que el implemento les diera un empujón extra con la energía que almacenaba.

La técnica que se utiliza actualmente es gracias a la flexibilidad de las garrochas de fibra de vidrio y de fibra de carbono utilizadas actualmente, ya que tienen mejor flexibilidad permiten al atleta tener un agarre más alto al igual que la garrocha puede almacenar más energía y empujar más fuerte al atleta. Los entrenadores y atletas han definido posiciones para la técnica del salto con garrocha.

Describiremos las posiciones para un saltador con pierna de despegue del lado derecho, si el saltador es zurdo es la misma técnica solo que se invierte la posición de las extremidades.

- Posicionamiento de Despegue: Esta posición hace referencia a la postura del atleta previo al último paso de la carrera, antes de saltar, lo importante en esta posición es la postura de los brazos, debe de estar el brazo izquierdo por encima de la altura del pecho y el brazo derecho ya por encima de la cabeza preparándose para el despegue, la cabeza junto con el tronco y la cadera están alineadas, las piernas siguen su trayectoria normal de carrera. En la figura 2.1 se aprecia esta posición, el atleta se prepara para realizar el despegue.



Figura 2.1 – Posición de Despegue.

- Despegue (Take off): Es el último paso de la carrera el atleta sube su pierna derecha, la rodilla derecha se debe elevar por encima de la cadera, la pierna izquierda debe de estar totalmente extendida ligeramente atrás de la cadera, el brazo derecho está completamente extendido ligeramente atrás de la cabeza, si dibujamos una línea la mano derecha al pie izquierdo deben de estar alineados, el brazo izquierdo debe de estar por encima de la altura de la cabeza, el tronco debe de estar firme alineada con la cabeza y la cadera. Como se muestra en la figura 2.2 el atleta está en la posición de despegue, el atleta todavía esta en contacto con el suelo.



Figura 2.2 – Despegue (Take off).

- Péndulo (Swing up): La posición de péndulo se refiere a cuando el atleta después de despegar la pierna derecha forma un ángulo de 90 grados entre la cadera, rodilla y tobillo, la rodilla está por encima de la cadera, la pierna izquierda se hiperextiende, la rodilla izquierda se flexiona un poco, el brazo derecho se encuentra completamente extendido, se sigue conservando la alineación de la mano derecha con el pie izquierdo, el brazo izquierdo debe de estar por encima de la altura de la cabeza y la mano izquierda un poco enfrente de la cabeza, el tronco debe de seguir alineado con la cabeza y cadera, sin embargo se empieza a inclinar levemente para pasar a la siguiente posición. La figura 2.3 muestra a el atleta en la posición de péndulo, ya no esta en contacto con el suelo.



Figura 2.3 – Péndulo (Swing up).

- Conchita (Roll back): En esta posición ambas piernas se juntan al pecho, las rodillas deben de tocar el pecho, los pies quedan por encima del tronco, el tronco junto con la cabeza y cadera siguen alineados, pero deben de estar paralelos a la horizontal del suelo, el brazo derecho sigue extendido y el brazo izquierdo ligeramente flexionado. Esta posición se muestra en la figura 2.4, la garrocha se encuentra ya flexionada.



Figura 2.4 – Conchita (Roll back).

- Extensión (Extension): El cuerpo se extiende a partir de la posición de conchita, los pies quedan por arriba de todo el cuerpo, la cadera queda por arriba del tronco, todo el cuerpo debe de estar alineado con excepción de los brazos, el brazo derecho sigue extendido y la mano derecha se pega al muslo derecho, el brazo izquierdo se flexiona y la mano izquierda se posiciona a la altura del pecho. La posición de extensión se muestra en la figura 2.5, la garrocha ya se encuentra casi totalmente extendida.



Figura 2.5 – Extensión (Extension).

- Posición en U (Pike): La última posición del salto se le denomina U ya que el cuerpo asemeja a esta vocal, pero invertida, la cadera en esta posición queda por encima de todo el cuerpo, se flexiona la cadera y los brazos junto con las piernas deben de acercarse mutuamente. Los pies y las manos tienen que estar a la misma altura para que la cadera se eleve lo máximo posible. Esta postura se puede apreciar en la figura 2.6, el atleta ya se encuentra por encima de la varilla.



Figura 2.6 – Posición en U (Pike).

La figura 2.7 es una secuencia del evento de salto con garrocha. Se enumeran las posturas anteriormente mencionadas. Posicionamiento de despegue (1), Despegue / Take off (2), Péndulo / Swing up (3), Conchita / Roll back (4), Extensión / Extension (5), Posición “U” / Pike (6).



Figura 2.7 -Técnica de Salto con Garrocha.

Fases del Salto

Principalmente se pueden describir cuatro fases del salto, las cuales son: carrera, despegue, máxima flexión de la garrocha y máxima altura.

Carrera (Approach, Pole Drop and Plant)

En esta fase el objetivo es alcanzar la máxima velocidad de la carrera que el garrochista pueda controlar antes de la siguiente fase, el despegue. Esta carrera oscila entre 30 a 40 metros, en la cual se dan de 10 a 20 zancadas. En la fase de carrera se encuentran tres momentos importantes los cuales son:

- Principio de la carrera (First part of the approach): El principio es importante ya que desde aquí se define la postura del atleta, el ritmo de la carrera y la longitud de los pasos. La posición de la garrocha debe de estar a un ángulo de 65° a 75° . Empezar con un ángulo más abajo provocara una aceleración temprana, rigidez en la carrera y fatiga temprana en los músculos, por el contrario, empezar con un ángulo mayor desembocara en zancadas más largas y un desbalanceo de arriba hacia abajo del centro de masa.
- Mitad de la carrera (Second or middle part of the approach): El ángulo de la pértiga en esta fase es entre 45° a 60° , la velocidad que se debe de alcanzar es el 90-95% de la velocidad máxima del saltador, en esta etapa se alcanza la longitud máxima de la zancada.
- Posicionamiento de despegue (Pole Drop and Plant): Los últimos pasos de la carrera se incrementa la frecuencia y se acorta ligeramente la longitud de las últimas zancadas. Al inicio de esta fase se comienza a descender la garrocha, jalando y rotando la mano derecha, la pértiga comienza a cruzar la línea horizontal, mientras sucede este movimiento el codo derecho se va desdoblado ligeramente atrás de la espalda este movimiento en los últimos dos pasos, para que en el último paso ya esté en el posicionamiento de despegue. La mano derecha por encima de la cabeza y el brazo derecho completamente extendido, la mano izquierda arriba de la altura del pecho y el brazo izquierdo extendido. No llegar a esta posición puede ser peligroso para el atleta. [7]

Despegue (Take off)

La eficiencia del despegue va relacionada con el posicionamiento de la última fase de la carrera, si se llega a la posición correcta no habrá pérdidas de energía. El despegue ideal es entre 20° a 22° ya que con este ángulo se obtiene pérdidas mínimas en la velocidad horizontal. Después del despegue se mantiene una postura clave para doblar más la pértiga llamada péndulo. El objetivo del péndulo es mantener el tronco erguido, con los brazos extendidos para mantener el cuerpo lo más alejado posible de la garrocha, el atleta intenta llevar su pecho hacia adelante en esta posición, mientras hace un balance con la pierna de despegue con el objetivo de llevar la cadera al frente.

Máxima flexión

Se alcanza la máxima flexión al pasar de la postura de péndulo a una postura llamada conchita, se comienza a mover los hombros hacia atrás, las piernas se doblan y el cuerpo adopta una posición horizontal con respecto al suelo. Las espinillas de las piernas pasan por la pértiga doblada y se elevan hasta el nivel de la cabeza y los hombros. Después de esta postura la garrocha se va a ir desdoblando y vamos a ir adoptando la postura llamada extensión, las piernas van hacia arriba y los hombros bajan, mientras se va girando sobre los hombros el cual debe terminar cuando los brazos terminan de estirar el cuerpo a lo largo del implemento. Lo ideal es que este movimiento sea lo más cercano a la garrocha en una línea paralela a cuando se desdobra por completo, esto provoca una mayor aceleración.

Máxima altura del centro de gravedad

Para alcanzar la máxima altura se debe de realizar todos los movimientos anteriormente mencionados y en la postura de extensión hacerlo rápido y coordinado para, después de que se consigue la máxima altura ya solo queda pasar la varilla, lo cual se sigue con la posición en extensión y se cambia a una posición en “U” donde se sume el estómago para evitar tocar la varilla.

Las fases anteriormente mencionadas se muestran en la figura 2.8, Carrera/Approach, Pole Drop and Plant (A), Despegue / Take off (B), Máxima Flexión (C), Máxima Altura del Centro de Gravedad (D).



Figura 2.8 - Fases de Salto con Garrocha.

Biomecánica

Es la ciencia que estudia a los seres vivos interna y externamente mediante la aplicación de las leyes de la mecánica. Su campo abarca desde el rendimiento deportivo hasta la rehabilitación clínica, como lo es la ergonomía, la ortopedia y el diseño de dispositivos médicos. A partir de modelos biomecánicos se puede estudiar la locomoción, la distribución de cargas articulares, así como patrones de activación muscular.

Sus orígenes se remontan a la Antigua Grecia, donde Aristóteles ya había propuesto explicaciones mecánicas sobre la marcha. Durante el Renacimiento, Leonardo da Vinci realizó estudios anatómicos detallados que incluían análisis funcionales de músculos y articulaciones.

En el siglo XVII, Galileo Galilei realizó trabajos como el salto del hombre, estudiando los sistemas de palancas óseas implicados, la ventaja de utilizar una pértiga para ayudarse a mantener el equilibrio sobre la cuerda floja y la marcha del caballo, incluso analizó la marcha de los insectos. Santorio estudió la cantidad de respiración que entraba y salía de los pulmones y la piel. William Harvey contribuyó con la mecánica del sistema vascular. René Descartes desarrolló el sistema de coordenadas cartesianas y la posibilidad de representar el movimiento mediante coordenadas. Por último, Giovanni Alfonso Borelli, quien es considerado uno de los fundadores de la biomecánica moderna por su aplicación de principios matemáticos y físicos al estudio del movimiento animal. [8]

Issac Newton desarrolló la Ley de la Gravitación Universal y sus tres famosas leyes del movimiento. (inercia, aceleración y acción-reacción) Estas leyes son fundamentales en biomecánica para analizar fenómenos cinéticos como los momentos articulares y las fuerzas durante el desplazamiento.

Con el avance de la tecnología en los siglos XIX y XX, la biomecánica evolucionó hacia un enfoque más cuantitativo. La incorporación de herramientas como la fotogrametría, las plataformas de fuerza y la electromiografía permitió medir con precisión variables como velocidad, aceleración, fuerza y activación muscular. En la actualidad, la disciplina se apoya en sistemas avanzados de captura de movimiento, sensores inerciales (IMUs) y software de simulación biomecánica, lo cual ha ampliado su aplicación tanto en entornos clínicos como deportivos de alto rendimiento.

Bases y Fundamentos del Movimiento Humano

Para poder describir el movimiento del cuerpo humano debemos plantear los sistemas de referencia que se utilizan desde la anatomía, posición anatómica, planos, ejes anatómicos, términos de ubicación anatómica, descripción del movimiento, posición fundamental y ángulos de las articulaciones, así como los elementos del sistema locomotor.

Terminología de la ubicación

La posición anatómica de un ser humano es una referencia universal y se refiere a la postura del cuerpo donde se está de pie de manera erguida, mirada al frente, brazos extendidos a los lados del cuerpo, palmas de las manos hacia adelante con los dedos extendidos juntos, piernas rectas y pies ligeramente separados apuntando hacia adelante.

Los planos anatómicos se derivan de la posición anatómica, se crearon para describir la ubicación. El plano sagital (medial) es vertical, divide el cuerpo en derecha e izquierda. El plano frontal (coronal) es vertical, divide el cuerpo en anterior (frontal) y posterior (dorsal). El plano transversal (horizontal) es horizontal, divide el cuerpo en superior e inferior.

Los ejes se definen por la intersección entre los planos, eje X es el que se crea a partir del plano transversal y el plano frontal, eje Y se forma por la intersección del plano sagital y frontal y el eje Z es la intersección de los planos transversal y sagital.

Para una mejor visualización se presentan en la figura 2.9 los planos anatómicos y ejes.

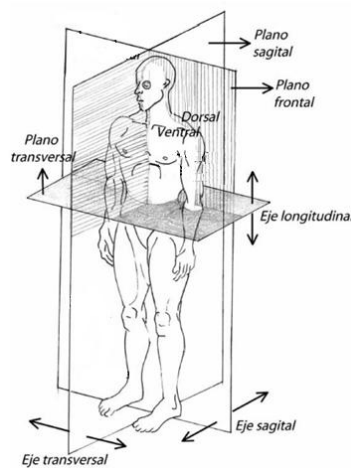


Figura 2.9 - Representación de Planos y Ejes Anatómicos. [8]

Por último, para poder hacer una descripción aún más precisa de la ubicación se han apropiado términos universales aceptados, figura 2.10. Como lo son superior-inferior, anterior-posterior, medial-lateral, proximal-distal.

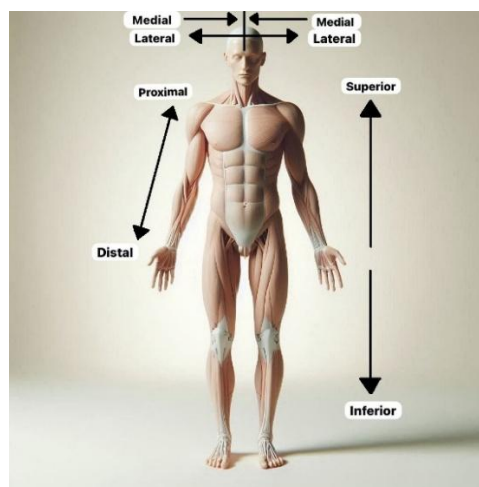


Figura 2.10 -Representación de Términos Anatómicos en la Posición Anatómica.

Sistema musculoesquelético (locomotor)

El sistema locomotor, figura 2.11. Permite al ser humano desplazarse en el espacio, mantener la postura corporal y realizar movimientos voluntarios. Lo conforma el sistema óseo y el sistema muscular, estos sistemas trabajan de manera simultánea con la ayuda de los ligamentos y tendones para garantizar el movimiento del individuo con el entorno.

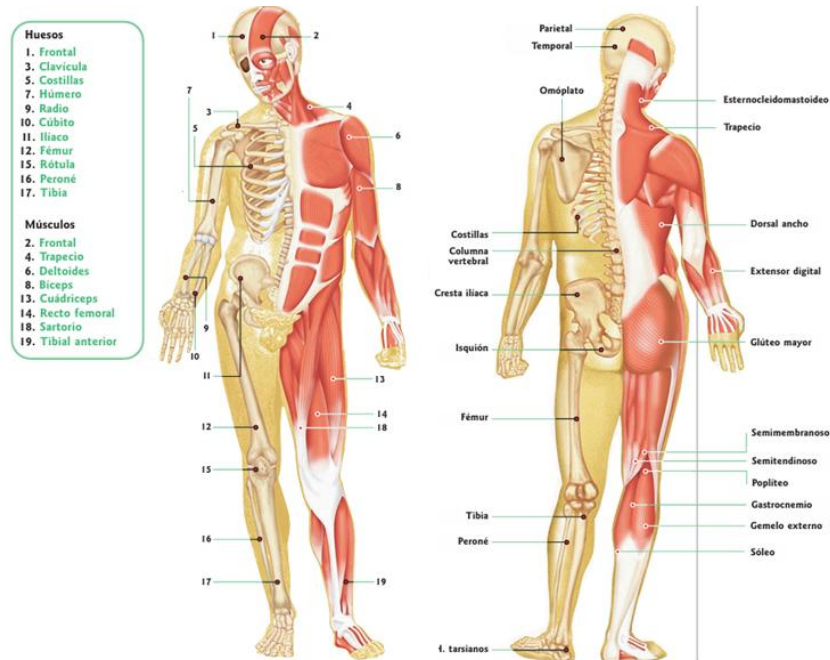


Figura 2.11 - Sistema Locomotor Vista Anterior y Posterior. [9]

Sistema Óseo

El sistema óseo, figura 2.12. Está formado por 206 hueso y representa aproximadamente el 20% del peso corporal total. Las funciones principales que cumple el sistema óseo es dar estructura al cuerpo, la protección de órganos vitales, proporcionar inserciones para los músculos, almacenamiento de minerales y producción de células sanguíneas. Es comúnmente conocido como esqueleto, normalmente se divide en esqueleto axial (cráneo, columna vertebral, costillas y esternón), el cual protege los órganos vitales, y esqueleto apendicular (extremidades superiores e inferiores, cintura escapular, cintura pélvica), principalmente involucrado en el movimiento y desplazamiento del cuerpo humano.

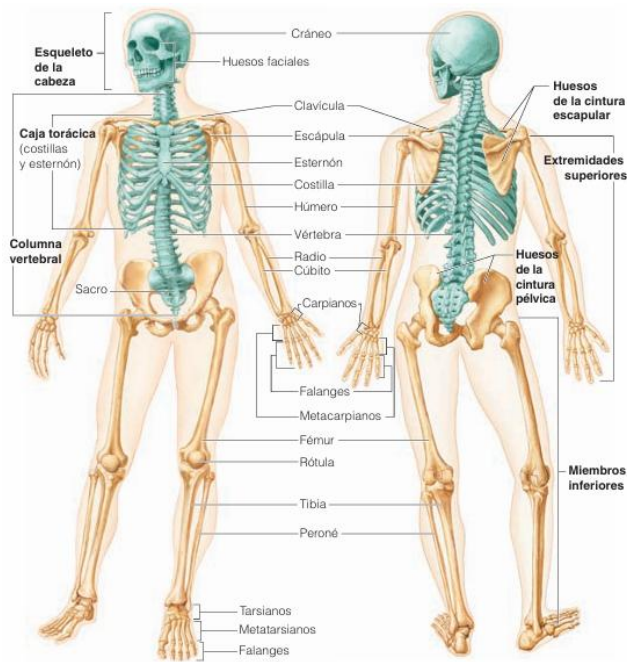


Figura 2.12 - Sistema Óseo Vista Anterior y Posterior. Color verde esqueleto axial, color dorado esqueleto apendicular. [10]

Macroscópicamente los huesos están conformados de dos tipos de tejido óseo, tejido óseo compacto (cortical) y tejido óseo esponjoso (trabecular). El tejido óseo compacto es denso y sólido forma la capa externa o corteza del hueso, proporciona resistencia mecánica, soporte estructural. El tejido óseo esponjoso es liviano y poroso, tiene una estructura compuesta de pequeñas láminas llamadas trabéculas, contienen médula ósea roja con el cual se producen células sanguíneas. La diferencia fundamental entre ambos tejidos radica en su porosidad; no obstante, ambos se consideran como un solo material estructural. Esta organización proporciona a los huesos una relación para soportar cargas mecánicas fuertes a pesar de ser ligeros. En la figura 2.13 se presenta un hueso largo para ejemplificar la anatomía en general de un hueso.

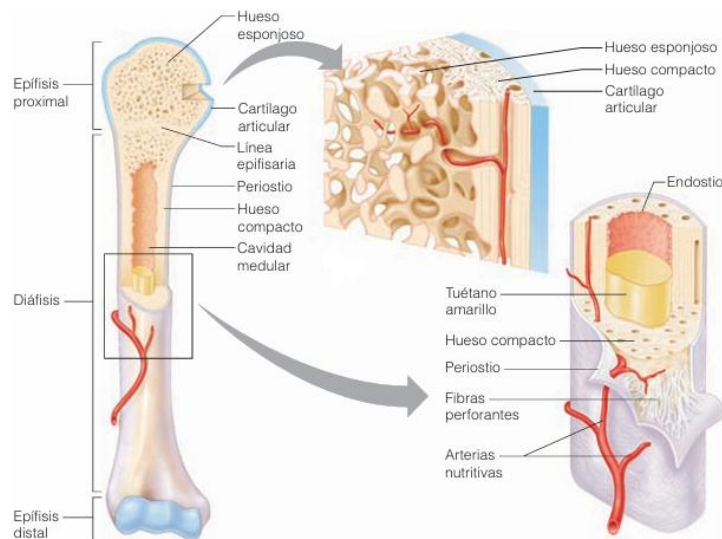


Figura 2.13 - Estructura Hueso Largo. [10]

Los huesos están clasificados según su forma.

- Huesos largos: Son más largos que anchos. Constan de una diáfisis (cuerpo) y dos epífisis (extremos). Están diseñados principalmente para soportar el peso corporal y facilitar el movimiento. Ejemplos: fémur, húmero, tibia.
- Huesos cortos: Tienen dimensiones similares en ancho, alto y largo. Proporcionan estabilidad y un rango limitado de movimiento. Ejemplos: huesos de la muñeca y del tobillo.
- Huesos planos: Son delgados y aplanados, y suelen ofrecer una amplia superficie para la inserción muscular, además de proteger estructuras internas. Ejemplos: escápula, esternón, huesos del cráneo.
- Huesos irregulares: Tienen formas complejas que no encajan en las categorías anteriores. Cumplen funciones específicas y a menudo protegen estructuras delicadas. Ejemplos: vértebras, coxis, pubis.
- Huesos sesamoideos: Son huesos pequeños, redondeados y que se desarrollan dentro de ciertos tendones. Ayudan a reducir la fricción y modificar la dirección de la fuerza muscular. El ejemplo más conocido es la rótula.

Las articulaciones, figura 2.14. Son los puntos de unión entre dos o más huesos, y su configuración determina el rango y tipo de movimiento que pueden realizar. Se clasifican según su funcionalidad y estructura en tres tipos diferentes.

1. Sinartrosis, articulaciones fibrosas: Son inmóviles, permiten un movimiento muy limitado. Carecen de cavidad articular y los huesos están unidos por tejido conectivo fibroso. Ejemplo: suturas craneales.
2. Anfiartrosis, articulaciones cartilagosas: Articulaciones semimóviles, permiten movimientos limitados. Están unidas por cartílago hialino o fibrocartílago y estabilizadas por ligamentos periféricos. Ejemplos: sínfisis púbica y articulaciones intervertebrales.
3. Diartrosis, articulaciones sinoviales: Articulaciones móviles, permiten una amplia variedad de movimientos están diseñadas para minimizar la fricción, distribuir las cargas articulares y permitir movimientos suaves y controlados. Se subdividen según las características de sus superficies articulares y los movimientos permitidos. Tienen una cavidad articular delimitada por una cápsula articular fibrosa y revestida internamente por una membrana sinovial, la cual secreta líquido sinovial que lubrica la articulación y nutre el cartílago articular.

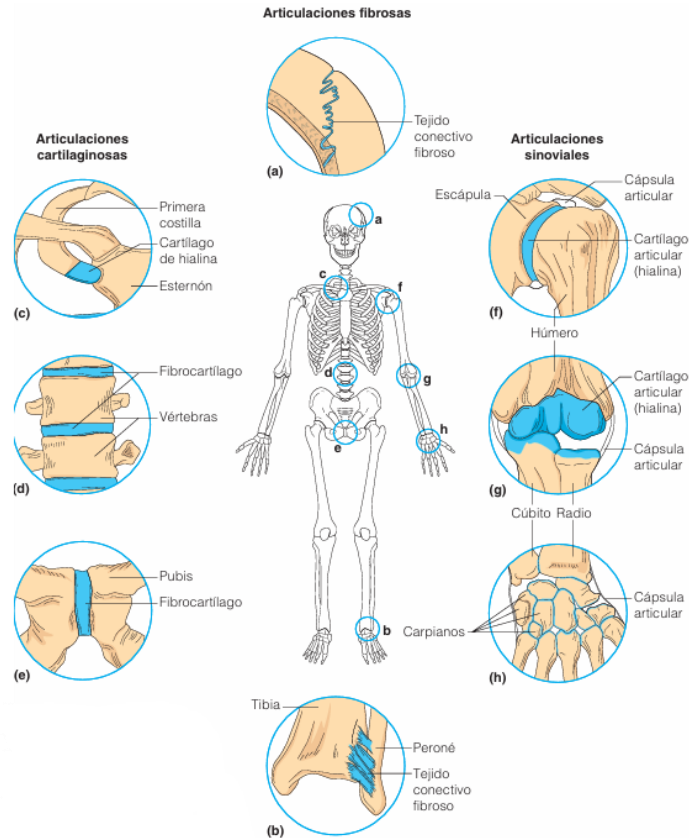


Figura 2.14 - Ejemplificación de Articulaciones en el Cuerpo Humano. [10]

Subtipos de articulaciones sinoviales (Diartrosis), figura 2.15.

- **Enartrosis (esferoide):** Las superficies articulares tienen forma esférica encajada en una cavidad esférica hueca. Permiten movimientos en todos los planos (triaxiales): flexión-extensión, abducción-aducción y rotación. Ejemplos: articulación glenohumeral (hombro) y coxofemoral (cadera).
- **Condiloidea (elipsoide):** Superficies articulares con forma de elipse u ovoide, permiten movimientos biaxiales: flexión-extensión y abducción-aducción. Ejemplos: articulación metacarpofalángica (nudillos), radiohumeral.
- **Encaje recíproco (silla de montar):** Ambas superficies articulares son cóncavas y convexas simultáneamente, encajando una en la otra. Permiten movimientos biaxiales con mayor amplitud. Ejemplo: articulación carpometacarpiana del pulgar.
- **Tróclea (bisagra):** La forma de las superficies articulares asemeja una polea. Permiten movimientos en un solo eje (uniaxiales): flexión y extensión. Ejemplos: codo (cúbito-húmero) y rodilla.
- **Trocoide (pivote):** Un hueso cilíndrico gira dentro de un anillo osteofibroso o cartilaginoso. Permiten rotación uniaxial sobre un eje longitudinal. Ejemplo: articulación atlantoaxial y radiocubital proximal.

- Artrodia (plana): Las superficies articulares son planas o ligeramente curvas, lo que permite movimientos de deslizamiento limitados, pero combinados pueden generar un rango funcional amplio. Ejemplos: articulaciones intercarpianas, intertarsianas, acromioclavicular.

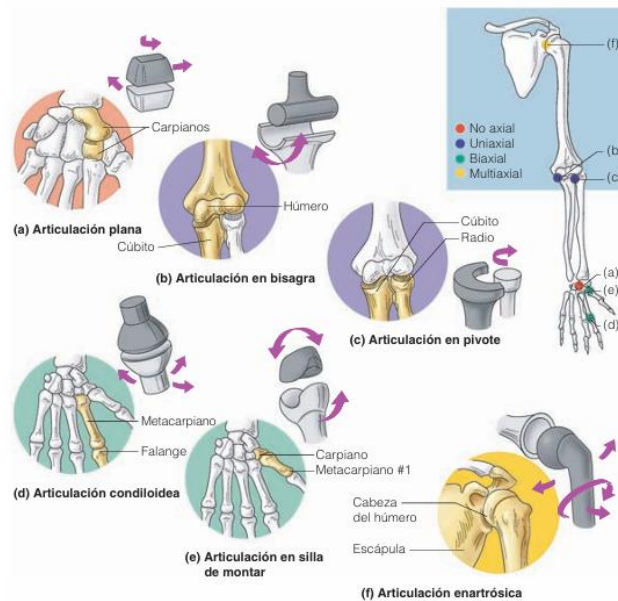


Figura 2.15 - Articulaciones Sinoviales. [10]

Ligamentos y Tendones

Los ligamentos y tendones están formados por tejido conectivo denso. Aunque poseen una composición similar basada en fibras colágenas, elásticas y reticulares, sus funciones son diferentes. Los ligamentos conectan hueso con hueso, su función es guiar y limitar el movimiento articular, o sea una mayor proporción relativa de fibras elásticas, permitiendo cierto grado de elongación antes de entrar en tensión. Los tendones unen los músculos con los huesos, presentan una alta proporción de colágeno que los hace extremadamente resistentes, pero menos elásticos y se encargan de transmitir la fuerza muscular. En la figura 2.16, se ejemplifica a través de la anatomía del pie la ubicación de los tendones y ligamentos.



Figura 2.16 - Anatomía del pie. Tendones de los dedos y ligamento del tobillo. [9]

Sistema Muscular

El sistema muscular, figura 2.17. Es el encargado de generar las fuerzas necesarias para producir movimiento, mantener la postura, estabilizar las articulaciones y controlar el equilibrio del cuerpo humano. Está compuesto por tres tipos principales de tejido muscular: liso, cardíaco y esquelético. La musculatura lisa se encuentra en las paredes de los órganos internos y vasos sanguíneos, y su contracción es involuntaria. El músculo cardíaco, es responsable de la contracción del corazón, también es involuntaria, pero presenta fibras estriadas. Finalmente, el músculo esquelético, está compuesto por fibras estriadas bajo control voluntario.



Figura 2.17 - Representación del Musculo Esquelético, Cardíaco y Liso. [10]

El musculo esquelético produce la fuerza para iniciar, sostener, frenar o desacelerar, estabilizar las articulaciones y transmitir potencia hacia objetos externos. Un músculo solo puede tirar, no empujar, y su acción depende de que cruce una articulación. Para que se pueda generar un movimiento los músculos transmiten la fuerza mediante los tendones. El movimiento inicia de la transmisión del impulso nervioso desde una motoneurona hacia la fibra muscular mediante la placa motora, este impulso provoca un acortamiento del musculo, lo que genera el movimiento.

El musculo posee cuatro propiedades fundamentales, las cuales vuelven al musculo un tejido resiliente, permiten que sea capaz de soportar cargas dinámicas, velocidades altas y variaciones en su longitud sin sufrir daño estructural.

1. Excitabilidad: capacidad de responder a un estímulo químico (neurotransmisor)
2. Contractilidad: capacidad de generar tensión y acortarse hasta un 50-70% de su longitud en reposo.
3. Extensibilidad: posibilidad de ser alargado por una fuerza externa o por la acción de un músculo antagonista.
4. Elasticidad: habilidad para recuperar su longitud original después de ser estirado.

Desde un punto de vista histológico y funcional el musculo esquelético tiene capas.

- Epimisio es la capa externa de tejido conectivo denso que envuelve al músculo y facilita su deslizamiento sobre estructuras vecinas.
- Perimisio envuelve los fascículos musculares (conjuntos de fibras musculares).

- Endomisio rodea cada fibra muscular individual.

Estas capas se continúan con el tendón, y este con el periostio óseo, lo que permite una integración entre músculo y hueso.

Una fibra muscular es una célula multinucleada alargada, compuesta por

- Sarcolema: membrana celular con propiedades eléctricas.
- Sarcoplasma: citoplasma que contiene mioglobina, glucógeno, lípidos y organelos especializados.
- Miofibrillas: estructuras contráctiles formadas por miofilamentos (actina y miosina), organizados en sarcómeros, unidad funcional de contracción.

En la figura 2.18 se ilustra la estructura macro y microscópica del músculo estriado esquelético.

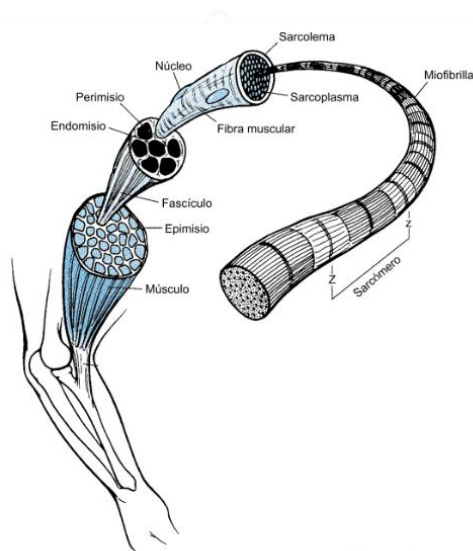


Figura 2.18 - Anatomía del Músculo. [11]

Las fibras musculares se clasifican según su velocidad de contracción y metabolismo predominante:

Tipo I (lentas, rojas) son de contracción lenta, metabolismo aeróbico, alta resistencia a la fatiga. Actividades de baja intensidad y larga duración (correr, caminar)

Tipo IIA (rápidas, intermedias) de contracción rápida, metabolismo mixto, buena resistencia a la fatiga. Deportes de intensidad moderada (natación 400 m, atletismo 800-1500 m)

Tipo IIB (rápidas, blancas) tienen contracción muy rápida, metabolismo anaeróbico, poca resistencia a la fatiga. Acciones explosivas (sprint, salto, levantamiento de pesas)

Tipo IIC es un intermedio, poco frecuentes. Transición entre tipo I y II

La proporción de tipos de fibras musculares está genéticamente determinada, aunque puede modificarse con el entrenamiento. Por ejemplo, deportistas de resistencia tienden a desarrollar una mayor proporción de fibras tipo I, mientras que velocistas muestran una mayor proporción de fibras tipo II.

Movimientos del Cuerpo Humano

El movimiento humano es el resultado de una la interacción entre los sistemas musculoesquelético, nervioso y sensorial. Los movimientos articulares ocurren alrededor de un eje de rotación perpendicular al plano en el que se produce el desplazamiento.

Movimientos en el plano sagital (eje frontal), figura 2.19.

- Flexión: Disminución del ángulo entre dos segmentos corporales.
- Extensión: Movimiento contrario a la flexión, incrementa el ángulo entre segmentos. Si la extensión sobrepasa la posición anatómica, se denomina hiperextensión.
- En el caso del tobillo, se utilizan los términos dorsiflexión (movimiento del pie hacia la tibia) y flexión plantar (movimiento del pie hacia abajo).

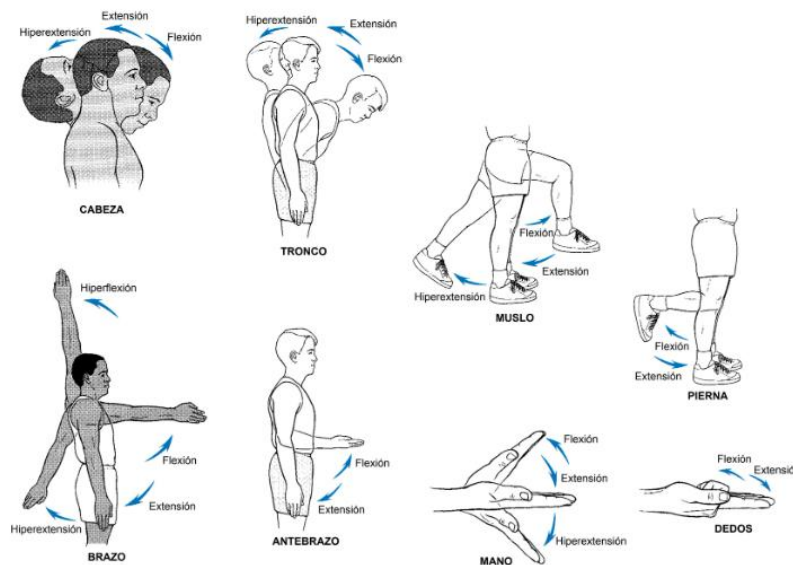


Figura 2.19 - Movimientos de Flexión y Extensión (eje frontal). [11]

Movimientos en el plano frontal (eje sagital), figura 2.20.

- Abducción: Movimiento lateral de una extremidad alejándose del plano medio del cuerpo.
- Aducción: Movimiento de regreso hacia el plano medio.
- En el antebrazo y la muñeca, se utilizan los términos flexión radial (desplazamiento hacia el radio) y flexión cubital (hacia el cúbito).
- Inversión y eversión del pie implican el movimiento de la planta hacia la línea media (inversión) o alejándose de ella (eversión).
- En el tronco es la flexión lateral (derecha o izquierda)

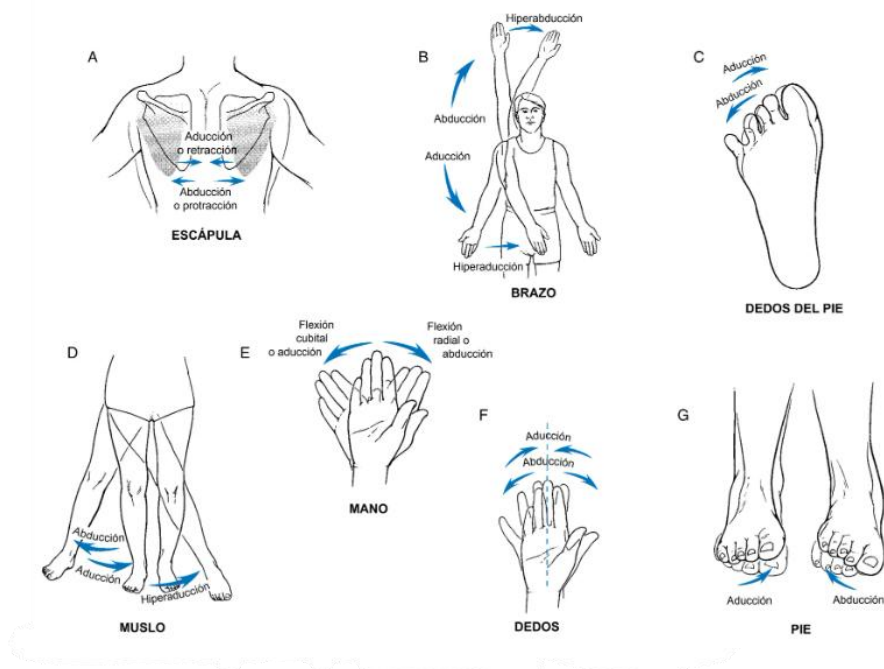


Figura 2.20 - Movimientos de Abducción y Aducción (eje sagital). [11]

Movimientos en el plano transversal (eje vertical), figura 2.21.

- Rotación interna (medial) y rotación externa (lateral): movimientos giratorios hacia dentro o fuera del eje longitudinal del cuerpo o de una extremidad.
- En el antebrazo, estos movimientos se conocen como pronación (rotación del radio sobre el cúbito con la palma hacia abajo) y supinación (palma hacia arriba).

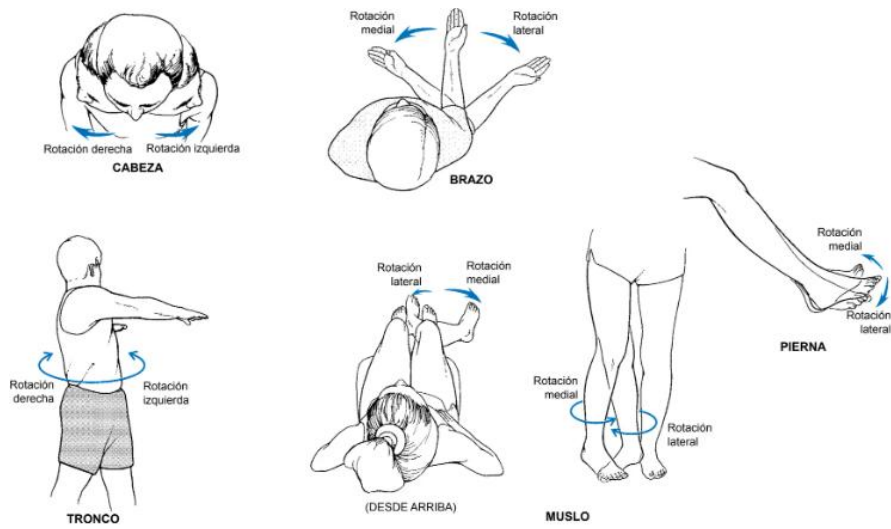


Figura 2.21 - Movimientos de Rotación (eje vertical). [11]

Además de estos movimientos básicos, existen acciones compuestas como la circunducción, que combina flexión, extensión, abducción y aducción, y movimientos específicos de la cintura escapular, la pelvis, el pulgar y el pie. Como se puede observar en la figura 2.22.

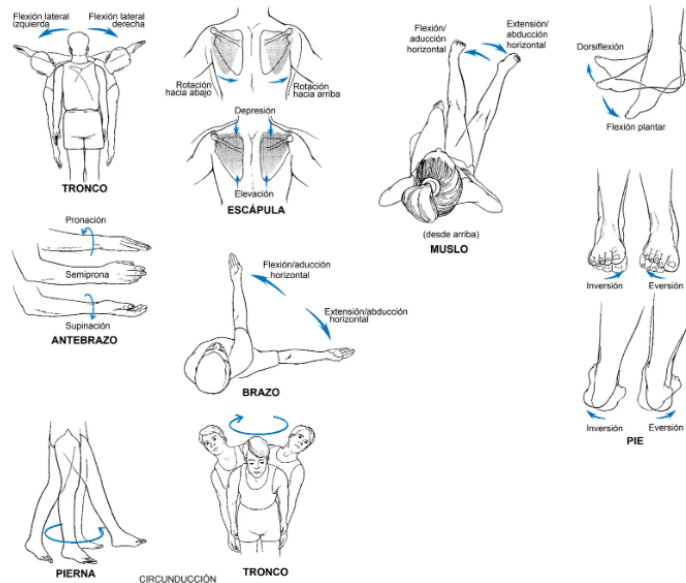


Figura 2.22 - Movimientos Especializados. [11]

Ángulos Articulares

Los ángulos articulares constituyen una medida clave para describir y analizar el movimiento humano, ya que definen la relación espacial entre dos partes del cuerpo unidas por una articulación. Para describir los ángulos articulares con precisión es imprescindible establecer una posición de referencia. La posición que se utiliza comúnmente es la posición fundamental, se asemeja a la posición anatómica que describimos anteriormente, pero con la diferencia de que las palmas están dirigidas hacia el cuerpo (posición neutra del antebrazo). En la posición fundamental los ángulos entre articulaciones se considera que es el punto de partida (cero).

Se puede medir de diferentes formas un ángulo articular, la forma en la que es medido es decidido por el objeto de estudio que se quiere visualizar. Un ángulo absoluto se refiere a la posición en la que el segmento corporal tiene con respecto a la horizontal del suelo. Un ángulo relativo es definido como el ángulo incluido entre dos segmentos, describe la posición de un segmento en relación con otro y su medición puede realizarse en uno de los tres planos anatómicos: sagital, frontal o transversal, dependiendo del tipo de movimiento analizado.

En la figura 2.23, se representan cuatro ángulos relativos de las extremidades superiores e inferiores, en el salto con garrocha.



Figura 2.23 - Ángulos Relativos de Articulaciones en las Extremidades Inferiores (Cadera, Rodilla, Tobillo) y de las Extremidades Superiores (Hombro, Codo, Muñeca)

Análisis del Movimiento

En biomecánica el análisis del movimiento se puede dividir en tres ramas, como ya se mencionó con anterioridad la biomecánica se rige por las leyes de la física específicamente las de la mecánica clásica, por lo cual de aquí provienen las dos primeras ramas la cinemática y dinámica. La tercera rama se define como Anatomía Funcional la cual estudia las partes del cuerpo involucradas en realizar movimientos, es más cualitativa a comparación de las otras dos ramas que son más cuantitativas. La figura 2.24 es un mapa mental donde se observa cómo están divididas las ramas de estudio de la biomecánica.

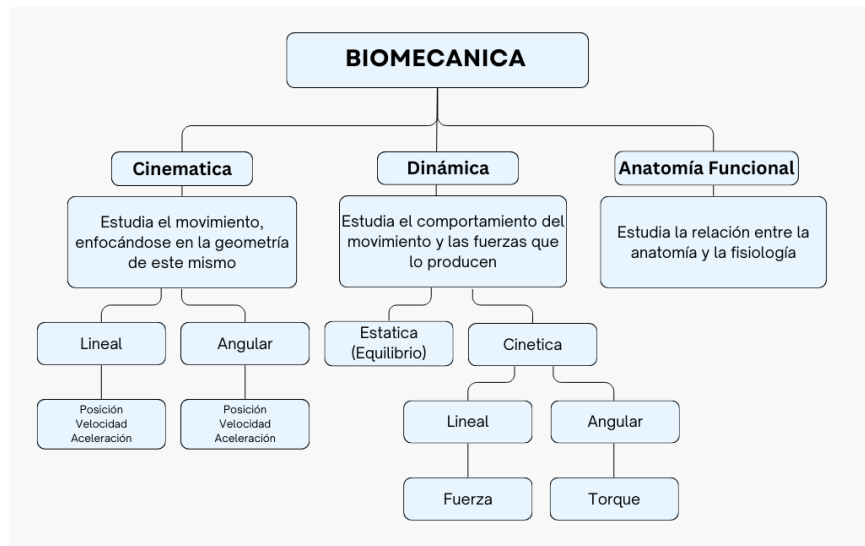


Figura 2.24 – Ramas de la Biomecánica que Analizan el Movimiento del Cuerpo Humano

La cinemática se ocupa de describir el movimiento sin considerar las fuerzas que lo causan, existen dos movimientos el lineal y angular. Un movimiento lineal se refiere a movimientos donde el objeto a analizar mantiene su postura, es decir si escogiéramos diferentes puntos en un objeto, estos puntos se moverían la misma distancia en la misma cantidad de tiempo. En un movimiento angular los puntos no recorren la misma distancia, sino que se mueven alrededor de un eje y se deben de mover el mismo ángulo en la misma cantidad de tiempo. Las variables como posición, velocidad (velocidad angular), aceleración (aceleración angular), ángulos y trayectorias son términos que se utilizan en la cinemática para describir un movimiento. En el deporte los movimientos no son puramente angulares ni lineales, usualmente se generan al mismo tiempo los dos tipos de movimiento.

La dinámica estudia las fuerzas que generan o modifican el movimiento, su estudio gira alrededor de las tres leyes de la mecánica de Isaac Newton. Las fuerzas que actúan en un movimiento lineal se les denomina fuerza y en el movimiento angular se le conoce como momento o torque. Términos como potencia, energía y trabajo derivan de la fuerza y el momento, todos estos se utilizan para describir un movimiento desde el enfoque de la dinámica.

Por último, la anatomía funcional igual estudia el movimiento, sin embargo, su enfoque es más cualitativo que cuantitativo. Describe los músculos involucrados para realizar el movimiento y como fisiológicamente actúan entre ellos para lograr dicho gesto motor. Términos anatómicos y fisiológicos son los que utiliza la anatomía funcional para describir el movimiento.

Modelos Biomecánicos del Cuerpo Humano

En la biomecánica para poder analizar un gesto motor es importante determinar un modelo biomecánico para dicha actividad. Plantear un modelo biomecánico puede ser difícil y para empezar se debe de realizar un modelo jerárquico, donde el nivel principal es el propósito por el que se realiza el movimiento. Este nivel se convierte en el criterio de rendimiento, posteriormente se divide en fases o subcriterios y finalmente se identifican características críticas o variables de rendimiento. Es importante que las variables de rendimiento deben ser observables o medibles. Las variables de rendimiento tienen un nivel inferior el cual describe los factores críticos que afectan a esta variable. En la figura 2.25, se ejemplifica como es un modelo jerárquico para un modelo biomecánico, es importante que este modelo puede cambiar en número de fases, variables de rendimiento y factores críticos dependiendo la naturaleza de la actividad a analizar.

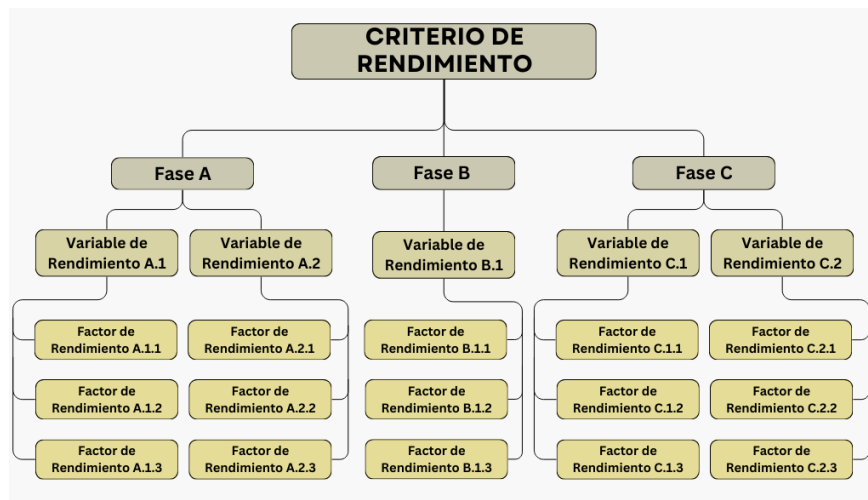


Figura 2.25 – Ejemplo de Modelo Jerárquico para Establecer un Modelo Biomecánico

El siguiente paso después de definir un modelo jerárquico, debemos plantear como podemos medir las variables de rendimiento. Medir cuantitativamente las variables es muy importante en la biomecánica, ya que si podemos medirlo se puede realizar una comparación entre otros eventos del mismo gesto motor y así establecer la eficiencia del criterio de rendimiento.

Finalmente se realiza un modelo del cuerpo humano para poder representar nuestro movimiento, usualmente se utiliza un diagrama de cuerpo libre donde los puntos articulares son la referencia del modelo y los segmentos corporales se pueden definir como objetos rígidos. Se realiza las mediciones de los factores de rendimiento de las variables de rendimiento que se definieron con el modelo jerárquico planteado y con estos datos, se puede lograr representar un modelo biomecánico del gesto motor, con el cual se puede modificar

las variables de rendimiento y comparar cual valor de estas mejoran la eficiencia de nuestro criterio de rendimiento.

Biomecánica Deportiva

La biomecánica deportiva es una rama de la biomecánica, la cual se enfoca en el estudio de la técnica, implementos u objetos utilizados por un deportista en el deporte, con el objetivo de mejorar la eficiencia del rendimiento del atleta y evitar lesiones. Con el análisis biomecánico se puede determinar factores críticos en el gesto motor realizado en la disciplina estudiada, de estos resultados se puede obtener una eficiencia del movimiento, plantear un modelo ideal para dicho gesto motor, proponer técnicas de entrenamiento y diseñar instrumentos para el entrenamiento del atleta.

Un análisis biomecánico en un deporte puede llegar a ser muy complejo, ya que intervienen muchos factores, desde el entorno en que se realiza la actividad, los implementos utilizados, las técnicas ya definidas y sobre todo que los movimientos analizados suelen ser muy rápidos. Por lo cual es importante tener un buen ojo clínico para identificar el criterio de rendimiento, establecer fases y definir los factores críticos para poder analizarlos y llegar a un buen análisis biomecánico que propicie buenos resultados.

Biomecánica en el Salto con Garrocha

En el salto con garrocha el objetivo principal es sobrepasar la máxima altura que el atleta pueda con la ayuda del implemento denominado garrocha, se han realizado diversos estudios analizando la biomecánica con el fin de mejorar el rendimiento del atleta y que logre optimizar el salto para obtener los mejores resultados.

Antecedentes

El estudio de la biomecánica del salto con garrocha actual comienza con la implementación de la garrocha de fibra de vidrio alrededor de los años 60. Los primeros estudios que se realizaron para tratar de entender la biomecánica del salto fue plantear un modelo matemático, usando variables independientes como el ángulo de despegue, la velocidad horizontal del despegue y la distancia entre la mano superior contra el pie de despegue. [12] Lo cual dio paso a buscar una forma de medir estas variables, gracias a un nuevo método para calcular el centro de gravedad de un atleta a partir de modelar 9 segmentos del cuerpo, se logró estudiar el movimiento del salto mediante energía cinética y energía potencial. [13] Lo más innovador para este momento fue cuando se planteó analizar con video el movimiento, además de incorporar una placa de presión en el área de despegue del salto y galgas extensométricas en el cajetín donde se apoya la garrocha con el propósito de obtener valores numéricos sobre las fuerzas aplicadas y velocidades. [14]

Un hito importante para el análisis de la biomecánica para el deporte fue cuando se propuso un método para analizar el momento angular de un cuerpo humano alrededor de tres ejes ortogonales que pasan a través de su centro de gravedad, el método Dapena. [15] Este método complementó lo que Barlow ya había realizado y en Alemania se realizó una investigación la cual por primera vez se agregaba el momento angular al análisis del salto con garrocha. [16] Sin embargo, fue en Francia donde se propuso un modelo matemático para analizar el momento angular del salto con garrocha. [17]

Para inicios del siglo XXI, los modelos matemáticos siguieron avanzando, con el método de Dapena se plantearon ecuaciones en tres dimensiones, afinando más los resultados de los análisis en dos dimensiones. A pesar de esta innovación, en un estudio hecho en Alemania se demostró que el análisis de la energía del salto con garrocha en un plano no tiene gran diferencia al análisis de energía del salto con garrocha en dos planos. [18] El mismo grupo de investigación 6 años después demostró que las ecuaciones de energía que plantearon son reproducibles. [19] Con esta comprobación, surge un nuevo interés en la biomecánica del salto con garrocha, se empezó a enfocar en como el atleta agrega energía al sistema y es en Francia donde se comienza con una investigación de cómo afecta el momento que ejerce el atleta sobre la pértiga. [20] En este mismo país se empieza a investigar con electromiografía como se van activando y las fuerzas aplicadas de los músculos de las extremidades superiores en diferentes etapas del salto. [21]

Los estudios más recientes se han enfocado en cómo es el movimiento de la garrocha, en la dirección de su forma de doblez [23] y en la rapidez con la que mecánicamente actúa, mediante análisis de elementos finitos. [24]

Variables Biomecánicas

En el análisis de movimiento del salto con garrocha se han realizado estudios cinemáticos y dinámicos, como se menciona anteriormente. El salto con garrocha se puede dividir en cuatro fases (carrera, despegue, máxima flexión y máxima altura), para poder definir que variables son de importancia y sus factores críticos, podemos realizar un modelo jerárquico.

El principal objetivo del salto con garrocha es lograr saltar la altura máxima, sabiendo esto podemos establecer como nuestro criterio de rendimiento la altura máxima. El siguiente paso es identificar las fases que comprenden nuestro evento, para fines prácticos estableceremos tres fases Carrera, Despegue, Vuelo. En la fase de vuelo juntamos la fase de máxima flexión y máxima altura, ya que después del despegue el atleta se encuentra en el aire hasta que finaliza el salto. Estas fases las subdividiremos para que sea más fácil su análisis, la carrera se subdivide en principio, mitad, final, el despegue es una fase muy corta por lo que no requiere subdividirse y la fase de vuelo la dividiremos en las fases que previamente juntamos máxima flexión y máxima altura, como se aprecia en la figura 2.26.

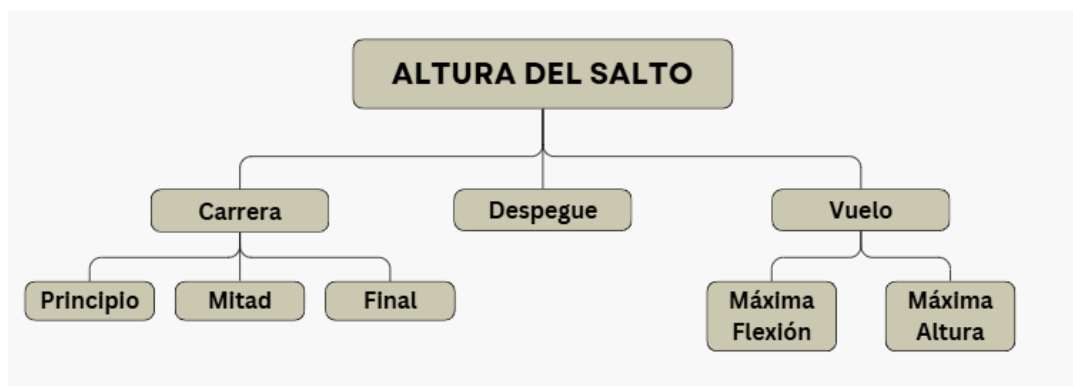


Figura 2.26 - Mapa Jerárquico Identificando Fases del Criterio de Rendimiento

A continuación, determinamos cuales son nuestras variables de rendimiento, guiándonos por el concepto de que el salto con garrocha a diferencia de otros saltos se utiliza un implemento el cual ayuda al atleta a conseguir más altura, podemos inferir por la tercera ley de Newton que mientras más fuerza le podamos transmitir al implemento mayor será la fuerza con la que empujara al atleta, entonces tomando esta premisa cuando el atleta le puede aplicar la fuerza a la garrocha es en el momento del despegue. Recordando la segunda ley de Newton, donde fuerza es igual a masa por la aceleración, mientras más aceleración lleve el atleta antes del despegue, se aportará más fuerza a la garrocha, esta aceleración se consigue a partir de la carrera.

La carrera como ya se menciona puede variar en los atletas en número de zancadas y el atleta suele ir acelerando de manera progresiva de menor velocidad al principio hasta mayor velocidad al final, por esto descartaremos analizar el principio y la mitad de la carrera, enfocándonos solamente en el final (últimos tres pasos) que es la fase inmediata al despegue y será con la velocidad con la que el atleta llegara a esta fase, considerando lo antes mencionado estableceremos como una variable de rendimiento la velocidad.

Después de la carrera viene el despegue y otra variable de rendimiento que podemos considerar es la altura del despegue, ya que el centro de masa del atleta está directamente relacionado con el despegue, mientras más alto sea el despegue del atleta su centro de masa se encontrará más arriba o, por el contrario, si está bajo su despegue su centro de masa estará bajo, la posición del centro de masa es importante ya que dependiendo en que posición se encuentre aplicara diferente fuerza a la garrocha.

La siguiente fase del despegue es el vuelo y la forma en que el atleta le agrega más fuerza a la garrocha es con la posición de péndulo y la posición de conchita que describimos con anterioridad, ya que estas posiciones se realizan antes de la máxima flexión de la garrocha y terminando esta etapa la garrocha se comienza a extender, lo cual indica que empieza a empujar al atleta.

En la última etapa del vuelo, es decir después de la máxima flexión de la garrocha el atleta ya no le aplica fuerza a la garrocha, sino que la garrocha le aplica la fuerza al atleta, en esta fase el atleta puede conseguir más altura realizando una correcta técnica realizando la posición de extensión ya que esta posición convierte al atleta menos pesado para la garrocha. Tomaremos como variable de rendimiento las posiciones de péndulo conchita y extensión.

En la figura 2.27, se agregan las variables de rendimiento mencionadas en los párrafos anteriores. Hubo una modificación en las fases, la fase de carrera se modificó por la fase de últimos tres pasos.

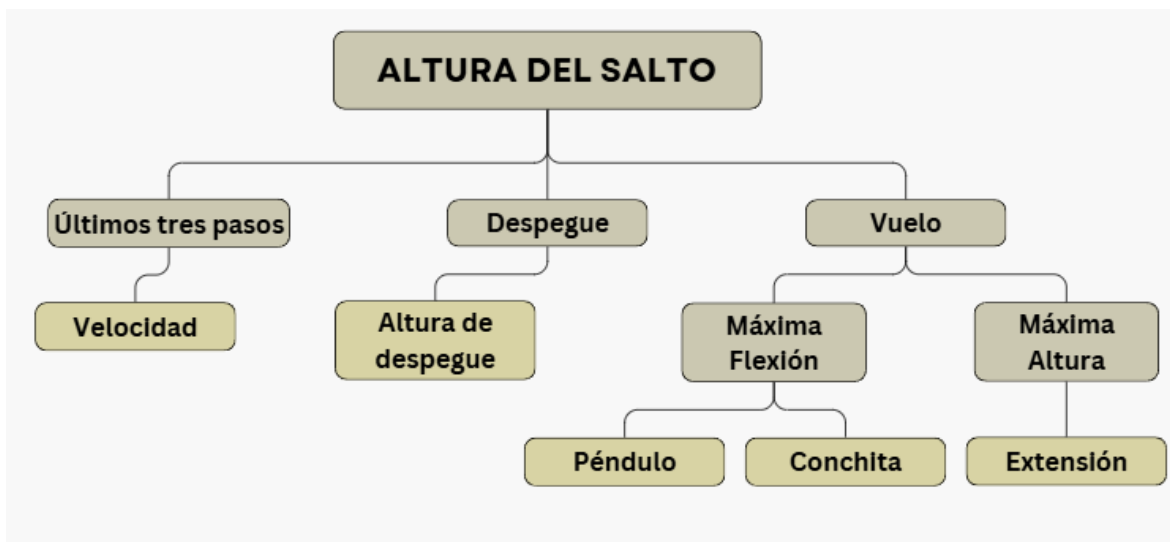


Figura 2.27 - Mapa Jerárquico Agregando Variables de Rendimiento

Una vez identificado las variables de rendimiento, es más fácil determinar los factores críticos. En la parte de velocidad, podemos definir como primer factor crítico la zancada del atleta, ya que la amplitud y frecuencia son características importantes de la velocidad en la carrera, se describe en la parte técnica que los últimos pasos de la carrera se deben de ir acortando y tienen que ser cada vez más rápidos con el objetivo de generar más velocidad. Otro factor crítico que considerar es la posición de la pisada con respecto al centro de masa, porque biomecánicamente si la pisada del atleta durante la carrera esta enfrente del centro de masa crea una desaceleración a diferencia de que si esta debajo de este o ligeramente atrás. Por último, en la carrera podemos considerar como factor crítico los ángulos articulares de los brazos, es importante descender la garrocha para llegar a la postura de despegue que es la fase siguiente.

En la variable de altura de despegue, un factor crítico muy importante es la postura del cuerpo, el atleta debe de estar en la posición de despegue la cual se describió con anterioridad. El siguiente factor por considerar es la ubicación del centro de masa, depende de que tan alto salte el atleta y la postura que adopte. La velocidad de la rodilla contraria a la pierna de despegue es un factor crítico, ya que ayuda a que el centro de masa del atleta se eleve. Un último factor crítico es el tiempo de contacto del pie de despegue con el suelo, este determina la potencia y fuerza con la que el saltador realiza el salto.

Para la variable de péndulo uno de sus factores críticos es el tiempo de esta fase, es determinante por que el saltador debe de estar en la posición de conchita antes de que la garrocha llegue a su máxima flexión. La velocidad de las extremidades inferiores es otro factor, hacer el movimiento rápido a la siguiente posición genera una mayor transferencia de fuerza a la garrocha. La postura del cuerpo es el último factor, es importante mantener la técnica de las posiciones, los atletas llegan a variar en la posición del cuerpo.

La Conchita como variable de rendimiento tiene varios factores críticos, el principal es la posición del tronco y la cabeza con respecto a la horizontal del suelo, este factor varía entre los atletas dependiendo la técnica. El doblez máximo de la garrocha es otro factor

importante, este valor varía dependiendo cuanta fuerza el atleta le transfirió el atleta durante las fases anteriores. Por último, el ángulo relativo del tronco con los muslos de ambas piernas, este ángulo es un indicador de la técnica del atleta para la postura de conchita.

En la Extensión, el factor crítico es la velocidad de extensión de la cadera, el atleta debe de extenderse coordinadamente con la extensión de la garrocha. Como último factor para esta variable es la postura del cuerpo.

En la figura 2.28 se muestra el mapa jerárquico completo para el análisis biomecánico del salto con garrocha, con el criterio de rendimiento, fases, variables de rendimiento y factores de rendimiento.



Figura 2.28 - Mapa Jerárquico con Factores de Rendimiento.

Técnicas de análisis

El análisis en la biomecánica como se describió anteriormente tiene tres ramas, la cinemática, la dinámica y la anatomía funcional. El estudio de las primeras dos ramas es cuantitativo, ya que obtenemos valores numéricos de ellas, mientras que la tercera rama es cualitativa, es decir, es más descriptivo. Nos enfocaremos en las técnicas de análisis de la cinemática y la dinámica.

Se puede medir de diferentes formas el movimiento en el salto con garrocha y las formas de medir las variables se dividen en técnicas de contacto directo y técnicas de contacto indirecto.

Las de contacto directo como su nombre lo dice están en contacto con la persona como pueden ser los IMU (velocidad y aceleración), los electros goniómetros (posición angular), acelerómetros (aceleración lineal), transductores de fuerza (fuerza), dinamómetros (fuerza), parches de electrodos (fuerza).

En las formas de medir de contacto indirecto se encuentra los velocímetros (velocidad lineal), la fotogrametría/video de alta velocidad (posición, velocidad, aceleración, fuerza), los sistemas opto eléctricos (posición, velocidad, aceleración, fuerza), celdas fotoeléctricas (velocidad y posición), plataformas de fuerza (fuerza).

Cinemática

La cinemática, estudia el movimiento enfocándose en la geometría de este mismo, movimientos lineales y angulares son los dos tipos de movimiento que existen y cada uno se le puede describir con posición, velocidad y aceleración.

Primero para poder analizar el movimiento en el salto con garrocha estableceremos un modelo del cuerpo humano con 17 puntos articulares. Los puntos articulares que se tomaran son: punta del pie, tobillo, rodilla, cadera, hombro, codo, muñeca, punta mano y cabeza. En la figura 2.29 se muestra la posición de los puntos articulares en el cuerpo del atleta.



Figura 2.29 - Representación de Modelo del Cuerpo Humano con 17 Puntos Articulares

Después de haber definido el modelo de cuerpo humano que se utilizara, se realizan las mediciones en estos puntos durante el movimiento para describirlo.

Movimiento Lineal (Posición, Velocidad, Aceleración)

Para poder medir la posición lineal debemos de conocer la distancia que nuestros puntos recorren, es decir tenemos un diferencial de distancia (Δd)

$$\Delta d = d_f - d_i$$

Donde d_f es distancia final y d_i es la distancia inicial, tomando un sistema de referencia de tres dimensiones (x,y,z) podemos definir ecuaciones para el diferencial de cada eje

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_f - x_i \\ \Delta y &= y_f - y_i \\ \Delta z &= z_f - z_i\end{aligned}$$

Donde Δx es la distancia recorrida en el eje x, Δz es la distancia recorrida en el eje z y Δy es la distancia recorrida en el eje y. Para poder representar nuestro diferencial de distancia hacemos uso del teorema de Pitágoras, donde primero calculamos en dos dimensiones y después en tres dimensiones

$$\begin{aligned}\Delta d_{2D} &= \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \\ \Delta d_{2D} &= \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2} \\ \Delta d_{3D} &= \sqrt{(\Delta d_{2D})^2 + (\Delta z)^2}\end{aligned}$$

Δd_{2D} en Δd_{3D}

$$\begin{aligned}\Delta d_{3D} &= \sqrt{\left(\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}\right)^2 + (z_f - z_i)^2} \\ \Delta d_{3D} &= \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2} \\ \Delta d &= \Delta d_{3D}\end{aligned}$$

La figura 2.30 es una representación gráfica del cálculo de la distancia de un punto en 3D.

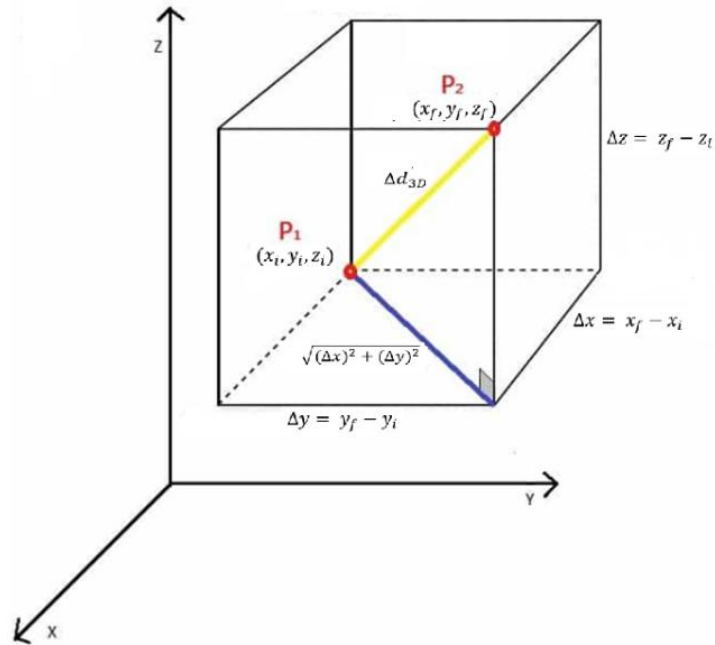


Figura 2.30 - Representación gráfica del cálculo de distancia entre dos puntos en sistema de referencia 3D

La velocidad lineal es definida por la física como la distancia recorrida entre el tiempo transcurrido a dicha distancia

$$v = \frac{d}{t}$$

En el análisis de la biomecánica se puede decir que la velocidad es un diferencial de distancia entre un diferencial de tiempo

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

$$v = \frac{d_f - d_i}{t_f - t_i}$$

En lo que respecta a la aceleración lineal la física la define como el cambio de la velocidad con respecto al tiempo

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$a = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$$

Es importante mencionar que si integramos la aceleración obtenemos la velocidad y de integrar la velocidad obtenemos la distancia.

$$v = \int_{t_1}^{t_2} a dt$$

$$d = \int_{t_1}^{t_2} v dt$$

Movimiento Angular (Posición, Velocidad, Aceleración)

En la cinemática el movimiento angular estudia el movimiento alrededor de un eje, un ángulo se crea a partir de dos líneas o planos que se cruzan en un punto el cual se llama vértice, en la biomecánica los movimientos angulares que se estudian suelen ser ángulos absolutos y ángulos relativos. Un ángulo absoluto hace referencia a el movimiento angular en relación con una referencia que no se mueve por ejemplo el suelo. Un ángulo relativo se mide comúnmente en las articulaciones, este eje al mismo tiempo se encuentra en movimiento lineal.

Un ángulo se puede medir en grados o radianes, una vuelta sobre el eje en radianes es igual a 2π radianes y 360° en grados, la conversión de radianes a grados es

$$rad = \frac{\theta \cdot \pi}{180}$$

$$\theta = \frac{rad \cdot 180}{\pi}$$

Para medir un ángulo absoluto de un segmento, como se muestra en la figura 2.31. Tomamos los puntos articulares que conforman nuestro segmento, la articulación más alejada en términos anatómicos será nuestra P_{distal} y nuestra articulación más cercana según los términos anatómicos será nuestra $P_{proximal}$, sabiendo las coordenadas cartesianas de cada uno podemos formar un triángulo escaleno y con la función trigonométrica de la tangente de un ángulo de un triángulo escaleno podemos obtener el ángulo absoluto con respecto al suelo de nuestro segmento.

$$\tan \theta = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}}$$

$$\tan \theta = \frac{Y_{proximal} - Y_{distal}}{X_{proximal} - X_{distal}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{proximal} - Y_{distal}}{X_{proximal} - X_{distal}} \right)$$

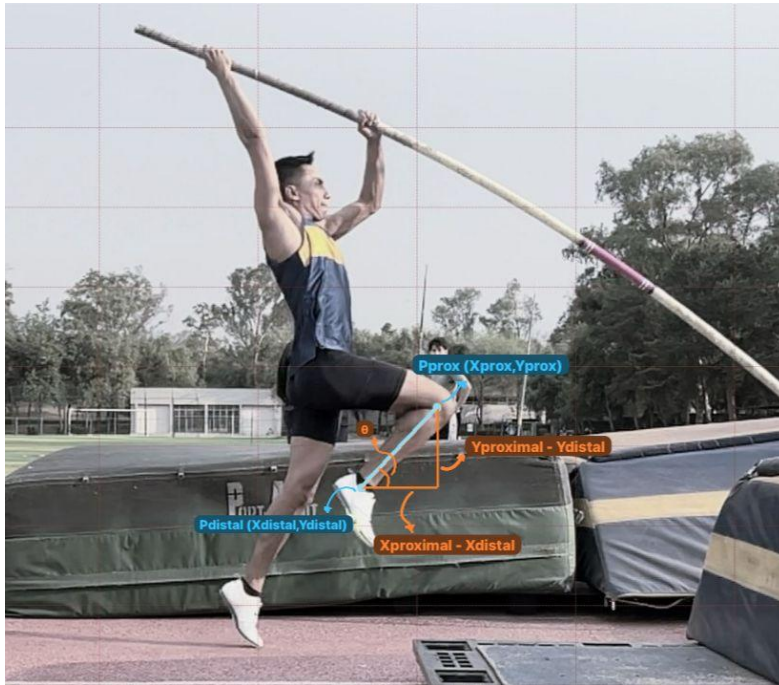


Figura 2.31 - Representación del Ángulo Absoluto de un Segmento con Respecto al Suelo

Los ángulos relativos en la biomecánica comúnmente se utilizan para medir ángulos entre tres articulaciones, la figura 2.32 ilustra un ángulo relativo entre las articulaciones de rodilla derecha, tobillo izquierdo y cadera. Conociendo tres puntos $P_A(X_A, Y_A)$, $P_B(X_B, Y_B)$, $P_C(X_C, Y_C)$ formamos un triángulo, usando el teorema de Pitágoras podemos calcular las longitudes de cada lado de nuestro triángulo, como este triángulo no necesariamente es un escaleno se utiliza la ley de cosenos para calcular el ángulo relativo entre las articulaciones

$$a = \sqrt{(X_B - X_C)^2 + (Y_B - Y_C)^2}$$

$$b = \sqrt{(X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2}$$

$$c = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2}$$

Ley de cosenos

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \theta$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \right)$$

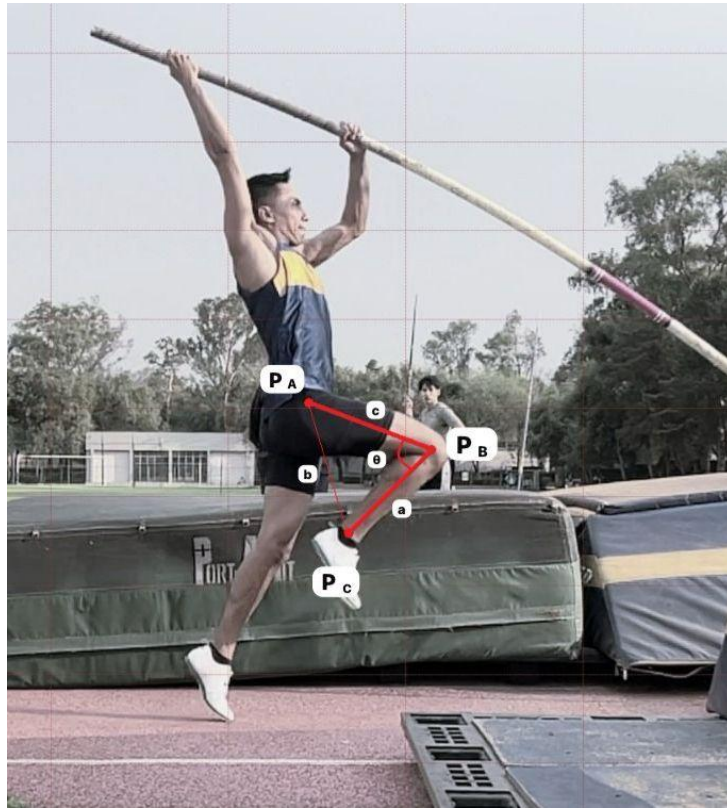


Figura 2.32 - Representación del Ángulo Relativo (Cadera, Rodilla, Tobillo)

Una vez definiendo el ángulo que se va a medir, se puede definir el movimiento angular conforme el atleta está en movimiento, si el ángulo es modificado tenemos un diferencial en este ángulo $\Delta \theta$

$$\Delta \theta = \theta_f - \theta_i$$

Donde θ_f es el ángulo final y θ_i es el ángulo inicial

Al igual que la velocidad lineal la velocidad angular está definida de la misma forma, la velocidad angular es la distancia angular recorrida entre el tiempo transcurrido.

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

$$\omega = \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i}$$

La aceleración angular es el cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo, es la misma expresión que la aceleración lineal.

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i}$$

Dinámica

La dinámica, estudia las fuerzas que generan o modifican el movimiento. Una fuerza se puede definir como la interacción entre dos objetos donde uno empuja o jala y el otro se resiste a este fenómeno. Esta fuerza puede producir movimiento, equilibrio, aceleración o cambio de dirección de los objetos. La fuerza se describe como un vector, es decir, tiene magnitud, dirección, punto de aplicación y línea de acción. El análisis de la fuerza gira alrededor de las tres leyes de Newton del movimiento.

1. Ley de Inercia: Cualquier objeto se mantendrá en estado de reposo o movimiento constante, hasta que otra fuerza lo modifique, es decir, si $\sum F = 0$ entonces $\Delta v = 0$
2. Ley de Aceleración: El cambio de movimiento de un objeto es proporcional a la fuerza aplicada y la dirección del movimiento es en línea recta en la dirección que se aplica la fuerza, se representa de la siguiente forma $\sum F = ma$
3. Ley Acción Reacción: A toda acción (fuerza) de un objeto aplicada a otro, habrá una reacción (fuerza) de la misma magnitud, pero en sentido contrario del segundo objeto al primero, entonces $\sum F_{A \text{ en } B} = -\sum F_{B \text{ en } A}$

Fuerza (Lineal)

Para comenzar con el análisis dinámico para fuerzas lineales, nos basamos en nuestro modelo que definimos anteriormente de 17 puntos articulares. Debemos primero de calcular el centro de masa del atleta (M_{cm}), se puede conocer si sumamos el centro de masa de cada segmento multiplicado por la proporción de masa (P_m) de cada segmento.

En el eje x

$$M_{cm_x} = \sum_{i=1}^{17} P_{m_i} x_{cm_i}$$

En el eje y

$$M_{cm_y} = \sum_{i=1}^{17} P_{m_i} y_{cm_i}$$

El cálculo del centro de masa de cada segmento se realiza con el apoyo de un estudio anatómico realizado previamente en cadáveres, se obtuvieron porcentajes para cada segmento del cuerpo en proporción al peso total del cuerpo. Conociendo la posición de las articulaciones que conforman nuestro segmento y con los porcentajes del centro de masa de cada segmento, se obtiene el centro de masa de cada segmento.

Segmento del cuerpo	Porcentaje del peso total del cuerpo de cada segmento (P_m)	Porcentaje de la longitud del segmento desde el extremo distal (P_{valor})
Cabeza, cuello	0.0810	0.500
Tronco	0.4970	0.495
Parte superior del brazo	0.0280	0.436
Antebrazo	0.0160	0.430
Mano	0.0060	0.506
Muslo	0.1000	0.433
Parte inferior pierna	0.0465	0.433
Pie	0.0145	0.500

Tabla 2.1 – Proporciones Antropométricas para el Cálculo del Centro de Masa. [24]

En el eje x

$$x_{cm} = x_{proximal} - [(longitudsegmento)(P_{valor})]$$

$$x_{cm} = x_{proximal} - [(x_{distal} - x_{proximal})(P_{valor})]$$

Donde $x_{proximal}$ es la coordenada en x de la articulación proximal en términos anatómicos, x_{distal} es la coordenada x de la articulación distal y P_{valor} es el valor del porcentaje de la longitud del segmento desde el extremo proximal que se encuentra en la tabla 2.1.

En el eje y

$$y_{cm} = y_{proximal} - [(longitudsegmento)(P_{valor})]$$

$$y_{cm} = y_{proximal} - [(y_{distal} - y_{proximal})(P_{valor})]$$

Donde $y_{proximal}$ es la coordenada en y de la articulación proximal en términos anatómicos, y_{distal} es la coordenada y de la articulación distal y P_{valor} es el valor del porcentaje de la longitud del segmento desde el extremo proximal.

En la figura 2.33 se ejemplifica los centros de masa de cada segmento con círculos amarillos y el centro de masa total como un punto amarillo.



Figura 2.33 - Representación de Centro de Casas en Cada Segmento (círculos amarillos) y Centro de Masa Total (punto amarillo)

En el análisis del movimiento lineal a las fuerzas se les denomina fuerza. El cálculo de las fuerzas se puede realizar para cada segmento conociendo el centro de masa del segmento, la masa del segmento y la aceleración del segmento, se puede obtener las fuerzas de reacción con el método de dinámica inversa o también conocido como formulación de Newton-Euler. En este método el sistema en consideración debe de estar bien definido por una serie de segmentos conectados. Se comienza analizando en el segmento más distal, a prosiguiendo con el siguiente segmento proximal y así sucesivamente. La figura 2.34 muestra una representación gráfica del análisis de dinámica inversa de los dos primeros segmentos.

La reacción en la primera articulación en el eje horizontal x, es

$$\sum F_{1x} = ma_{1x}$$

$$R_{1x} = ma_{1x}$$

La reacción en el eje vertical y, es

$$\sum F_{1y} = ma_{1y}$$

$$R_{1y} - m_1g = ma_{1y}$$

$$R_{1y} = ma_{1y} + m_1g$$

Entonces, para calcular la reacción en la segunda articulación en el eje x

$$\sum F_{2x} = ma_{2x}$$

$$R_{2x} + R_{1x} = ma_{2x}$$

$$R_{2x} = ma_{2x} - R_{1x}$$

Para la reacción de la segunda articulación en el eje y

$$\sum F_{2y} = ma_{2y}$$

$$R_{2y} - m_2g + R_{1y} = ma_{2y}$$

$$R_{2y} = ma_{2y} - m_2g - R_{1y}$$



Figura 2.34 - Representación Gráfica del Método Newton Euler para Dos Segmentos

También se puede calcular el impulso, un impulso es una Fuerza aplicada en un periodo de tiempo. Relaciona el momento de un objeto con la fuerza y el tiempo en la que la fuerza actúa.

Deriva de la segunda ley de Newton, recordando que la aceleración es el diferencial de la velocidad entre tiempo

$$F = ma$$

$$F = m \left(\frac{dv}{dt} \right)$$

$$F = d \left(\frac{mv}{dt} \right)$$

$$Fdt = d(mv)$$

$$Fdt = mv_{final} - mv_{inicial}$$

Donde mv se refiere al momento de un objeto ($p=mv$), el lado derecho de la ecuación sería el cambio del momento del objeto y el lado izquierdo Fdt es el impulso. Las unidades del impulso son $N \cdot s$

Si relacionamos la fuerza con la distancia obtenemos el trabajo, el trabajo (W) es definido en la mecánica como el producto de la magnitud de la fuerza aplicada a un objeto por la distancia que el objeto se mueve. Sus unidades son $N \cdot m$ (Joule)

$$W = F \cdot d$$

Si evaluamos el trabajo realizado entre el tiempo transcurrido obtenemos la potencia (P). Como el trabajo es el producto de la fuerza por el diferencial de distancia, se puede relacionar la velocidad.

$$P = \frac{\Delta w}{\Delta t}$$

$$P = \frac{\Delta(F \cdot d)}{\Delta t}$$

$$P = F \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

$$P = F \cdot v$$

Torque (Angular)

En la mecánica cuando una fuerza provoca rotación, la rotación ocurre alrededor de un eje y se le denomina Torque o Momento Angular. En un análisis en 2D (x,y) el Torque se produce en un eje ortogonal a los dos ejes, eje z.

Las características del Torque son la magnitud y la distancia más corta o perpendicular del punto donde se ejerce la fuerza hacia el eje de rotación, puede expresarse de la siguiente manera

$$T = F \cdot r$$

Donde T es Torque, F es la fuerza aplicada en newtons, r es la distancia perpendicular en metros desde el punto donde se aplica la fuerza hacia el eje de rotación o también conocido como brazo de palanca.

Para medir los torques en biomecánica, al igual que en la sección pasada calculamos el centro de masa de cada segmento para hacer las mediciones de fuerza, para calcular el torque de nuestro atleta (M) debemos de calcular el momento de inercia de cada segmento. En el cálculo del momento de inercia de cada segmento usaremos la proporción para el radio de giro de cada segmento, el cálculo de momento de inercia es de la siguiente manera

$$I_{seg} = m(\rho l)^2$$

Donde I_{seg} es el momento de inercia en el segmento, m es la masa del segmento, ρ es la proporción de radio de giro del segmento que se encuentra en la Tabla 2.2, l es la longitud del segmento.

Segmento del cuerpo	Proporción del radio de giro del segmento en su centro de masa (ρ)
Cabeza, cuello, tronco	0.503
Parte superior del brazo	0.322
Antebrazo	0.303
Mano	0.298
Muslo	0.323
Parte inferior pierna	0.302
Pie	0.475

Tabla 2.2 – Proporciones Antropométricas para el Cálculo de Inercia de Segmentos. [24]

Se puede calcular igualmente el momento de inercia del segmento en los puntos articulares usando el teorema llamado eje paralelo, que permite obtener el punto de inercia en cualquier eje paralelo

$$I_{eje} = I_{seg} + m_{seg}(r)^2$$

Donde I_{eje} es el momento de inercia en el eje de la articulación, I_{seg} es el momento de inercia del segmento, m_{seg} es la masa del segmento, r es la distancia entre el centro de masa al punto del eje de la articulación.

El cálculo del momento de inercia de todo el cuerpo es la suma del momento de inercia de cada segmento más los términos de transferencia del centro de masa de cada segmento.

$$I_{Total} = \sum_{i=1}^N I_{seg_i} + \sum_{i=1}^N m_i(r_i)^2$$

Donde I_{Total} es el momento de inercia del atleta, I_{seg} es el momento de inercia del segmento, m es la masa del segmento, r es la distancia entre el centro de masa del segmento al centro de masa del atleta, N es el número de segmentos.

Conociendo los momentos de inercia de nuestro modelo podemos iniciar con el cálculo de los Torques, al igual que en la sección pasada utilizaremos la formulación de Newton Euler para calcular las reacciones en las articulaciones de nuestro segmento.

De la segunda ley de newton podemos definir que el Torque es igual al momento de Inercia multiplicado por la aceleración angular

$$\sum T = I \alpha$$

Tomando esto en consideración y con el cálculo de las reacciones en la articulación que se realizó en la sección pasada podemos obtener el momento angular de nuestro segmento.

$$\sum M_1 = I_1 \alpha_Z$$

$$M_{segmento} - M_{Rx} - M_{Ry} = I_1 \alpha_Z$$

$$M_{segmento} = I_1 \alpha_Z + M_{Rx} + M_{Ry}$$

$$M_{segmento} = I_1 \alpha_Z + (F_{Rx} \cdot r_x) + (F_{Ry} \cdot r_y)$$

Donde $M_{segmento}$ es el Torque del segmento, I_1 es el momento de inercia del segmento, α_Z es la aceleración angular, F_{Rx} es la fuerza de reacción de la articulación en el eje x, r_x es la distancia en el eje x entre la articulación y el centro de masa del segmento, F_{Ry} es la fuerza de reacción de la articulación en el eje y, r_y es la distancia en el eje y entre la articulación y el centro de masa del segmento

La figura 2.35 es una representación grafica del calculo del momento en el primer segmento y la primera articulación.



Figura 2.35 - Representación del Análisis del Momento en Un Segmento Mediante el Método Newton-Euler

El impulso angular se define igual que en el impulso lineal, parte de la segunda ley de newton.

$$T = I \alpha$$

$$T = I \left(\frac{d\omega}{dt} \right)$$

$$T = \frac{d(I\omega)}{dt}$$

$$T dt = d(I\omega)$$

$$T dt = I\omega_{final} - I\omega_{inicial}$$

Donde $I\omega$ se refiere al momento angular de un objeto, el lado derecho de la ecuación sería el cambio del momento angular del objeto y el lado izquierdo $T dt$ es el impulso. Las unidades del impulso angular son $N \cdot s$

El trabajo angular está definido por el momento angular multiplicado por el ángulo recorrido, expresado matemáticamente

$$W_{angular} = T \cdot \Delta\theta$$

$$W_{angular} = T(\theta_{final} - \theta_{inicial})$$

Por último, la potencia angular se obtiene derivando el Trabajo Angular entre el tiempo transcurrido

$$P_{angular} = \frac{dW_{angular}}{dt}$$

$$P_{angular} = W_{angular} \cdot \omega$$

Energía Mecánica

La energía se puede definir como la capacidad de realizar trabajo. Existen muchos tipos de energía como lo son la energía nuclear, energía térmica, energía eléctrica, energía luminosa, energía química y la energía mecánica.

Para nuestro análisis nos enfocaremos en la energía mecánica. La energía total (E_{Total}), es igual a la suma de la energía cinética de translación (E_{CT}), la energía cinética de rotación (E_{CR}) y la energía potencial del centro de masa (E_p).

$$E_{Total} = E_{CT} + E_{CR} + E_p$$

$$E_{CT} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$E_{CR} = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$$

$$E_p = mgh$$

$$E_{Total} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I \cdot \omega^2}{2} + mgh$$

Donde m es la masa del objeto analizado, v es la velocidad lineal del objeto analizado, I es el momento de inercia del objeto analizado, ω es la velocidad angular del objeto analizado, g es la constante de gravedad y h es la altura del centro de masa del objeto analizado.

Fotogrametría Secuencial

La fotogrametría es una técnica que permite obtener mediciones precisas a partir de imágenes fotográficas o secuencias de video, se ha convertido en una herramienta fundamental en distintas disciplinas dentro de la investigación. Su origen se remonta a mediados del siglo XIX, el geodesta francés Dominique François Jean Arago propuso su uso para obtener levantamientos topográficos a partir de fotografías. Inicialmente la fotogrametría se aplicó en campos como la topografía, la cartografía y la ingeniería, la fotogrametría evolucionó rápidamente con los avances en óptica, fotografía aérea y, más tarde, procesamiento digital. [25]

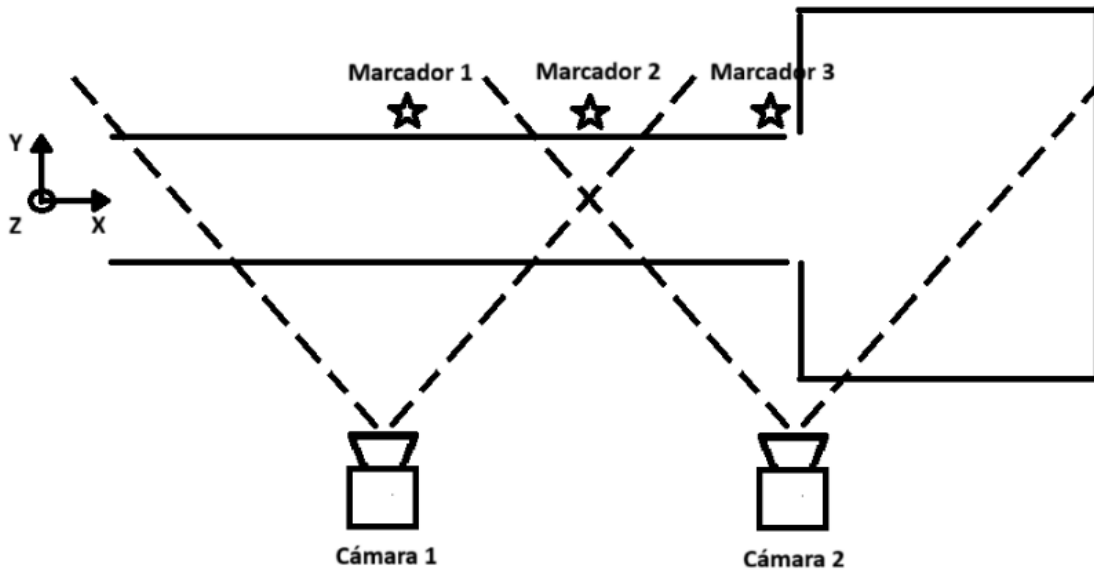


Figura 2.37 - Representación de Posicionamiento de Cámaras para un Estudio de Fotogrametría Secuencial 2D para Salto con Garrocha en el Plano x, z. Las cámaras están paralelas al plano de acción y los marcadores son objetos de los cuales se conoce su distancia entre ellos.

Para un análisis cuantitativo preciso del movimiento, es importante utilizar una frecuencia de muestreo adecuada. Se recomienda un mínimo de 25 Hz para actividades como la natación, mientras que, para movimientos más rápidos, como un saque de tenis o un swing de golf, pueden requerirse 50 Hz o incluso 100 Hz. Según el teorema de muestreo de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal, con el fin de evitar errores como el aliasing. Sin embargo, se puede utilizar una mayor frecuencia de muestreo, lo cual mejora la resolución temporal, incrementando la precisión en el cálculo del desplazamiento, la velocidad y la aceleración. [26]

La obtención de las coordenadas se realiza con software especializado o herramientas de código abierto (Tracker, Kinovea) esto permite automatizar parte del proceso de extracción de datos, mejorando la eficiencia y la precisión del análisis. Finalmente, con los datos obtenidos es posible construir modelos biomecánicos simplificados que permiten estudiar la biomecánica.

Capítulo 3 - Metodología

El objetivo es identificar patrones biomecánicos que influyen en la eficiencia del gesto motor en el salto con garrocha. El estudio mediante fotogrametría es el método que mejor se adapta para medir la biomecánica en el salto con garrocha, al ser un método que no requiere estar en contacto con el atleta. En este capítulo se discutirá el grupo de estudio, instrumentación, modelo del cuerpo humano, procedimientos y procesamiento de datos

Grupo de Estudio

El grupo de estudio se conforma de los mejores atletas mexicanos especializados en salto con garrocha, de nivel licenciatura en el Campeonato Nacional Universitario de Atletismo 2025. Esta competencia fue realizada por la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) en la Pista de calentamiento de Ciudad Universitaria, Ciudad de México. La competencia tuvo lugar del 8 al 10 de mayo de 2025.

Para poder llegar a competir los atletas pasaron filtros de selección internos en su universidad y después estatales. En el estudio se seleccionaron 7 atletas masculinos de la prueba salto con garrocha, con una edad entre 18 a 23 años. Los atletas reportaron verbalmente que no presentaban lesiones y se encontraban bien de salud. El nivel de experiencia de cada atleta varía por los años que lleva practicando cada uno la disciplina, sin embargo, todos ya habían practicado por más de un año la disciplina.

Las universidades en donde estudian los atletas son la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Universidad Autónoma de Nayarit (UAN) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se les contacto a los entrenadores de cada atleta, para que permitieran la participación de su atleta en el estudio. Antes de la prueba se realizó una reunión con los atletas donde se les explico cómo era el procedimiento del estudio y el objetivo de este. Se les proporciono un consentimiento informado a cada atleta el cual leyó cada uno y lo firmo aceptando realizarse el estudio.

Se realizo una medición antropométrica de cada atleta, se midió altura, peso, longitud de hombro-codo, longitud codo-muñeca, longitud cadera-rodilla, longitud rodilla talón. Tabla 3.1.

Atleta	E.H. UANL	L.E. UANL	A.G. UANL	A.E. UAN	A.A. UAN	L.M. UNAM	J.P. UNAM
Peso (kg)	72.00	69.50	60.70	66.90	61.50	62.60	67.90
Altura (m)	1.73	1.71	1.76	1.72	1.72	1.76	1.75
Hom-Cod (cm)	32.0	34.5	35.0	32.5	34.0	32.0	39.0
Cod-Muñ (cm)	29.0	26.0	25.5	24.5	27.0	28.0	29.0
Cad-Rod (cm)	43.5	49.5	50.0	49.5	49.5	52.0	47.0
Rod-Tob (cm)	44.0	44.5	46.5	41.5	42.0	43.0	45.0

Tabla 3.1 - Medidas Antropométricas del Grupo de Estudio

Instrumentación

La instrumentación utilizada para la medición de la biomecánica de salto con garrocha.

- Cámara 1: Cámara de video de alta velocidad SVSi StreamView-LR™ (200 fps), lente fotográfico Fujinon® (1:1.4 / 9 mm).
- Cámara 2: Cámara de video de alta velocidad Phantom® Miro® M110 (1600 fps), lente fotográfico Nikon® AF Nikkor (1:2 / 35 mm).
- Cámara 3: Cámara de video de alta velocidad PXW-Z90 Sony (1000 fps), lente fotográfico (3:2 / 35 mm)
- Cámara 4: Cámara de video de alta velocidad RX10 Sony (200 fps), lente fotográfico ZEISS Vario-Sonnar T (8.8 / 220 mm)
- Computadora Portátil 1: Laptop Dell™ Latitude E7440, sistema operativo Microsoft® Windows® 7, procesador Intel Core™ i5, tarjeta de video con gráficos integrados Intel.
- Computadora Portátil 2: Laptop Asus® Rog GI551 jw-ds71, sistema operativo Microsoft® Windows® 8, procesador Intel Core™ i7, tarjeta de video Nvidia® Gtx960m.
- Cinta métrica. (Sensibilidad 1 mm)
- Flexómetro. (Sensibilidad 1 mm)
- Bascula. (Sensibilidad 10 g)
- Conos
- Cinta quirúrgica
- Kinovea
- Matematicas Wolfram

En la figura 3.1 se muestra cómo se posicionaron las cámaras en la zona de salto, los marcadores que se utilizaron para la calibración de distancia fueron unos conos (círculos de color naranja) colocados a 2.25 m entre ellos

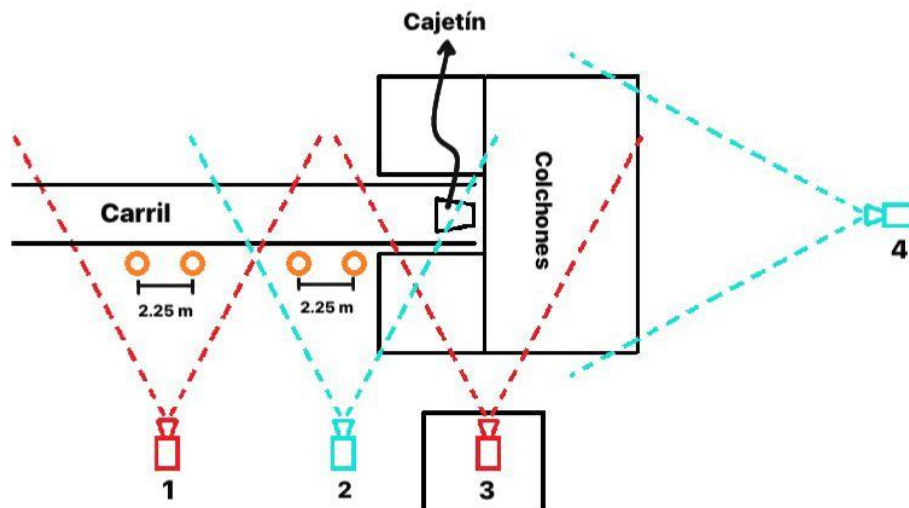


Figura 3.1 - Representación Gráfica del Posicionamiento de las 4 Cámaras en la Zona del Salto con Garrocha

Modelo del Cuerpo Humano

Para el análisis se plantea un modelo del cuerpo humano de 16 segmentos rígidos con 17 puntos articulares, basado en este modelo se analizará el movimiento en el salto con garrocha. Se realizarán los análisis cinemáticos y dinámicos para describir el movimiento del salto, como se ilustra en la figura 3.2 la posición de cada punto articular y los segmentos que forman entre ellos. En la tabla 3.2, se describe cada elemento del modelo.

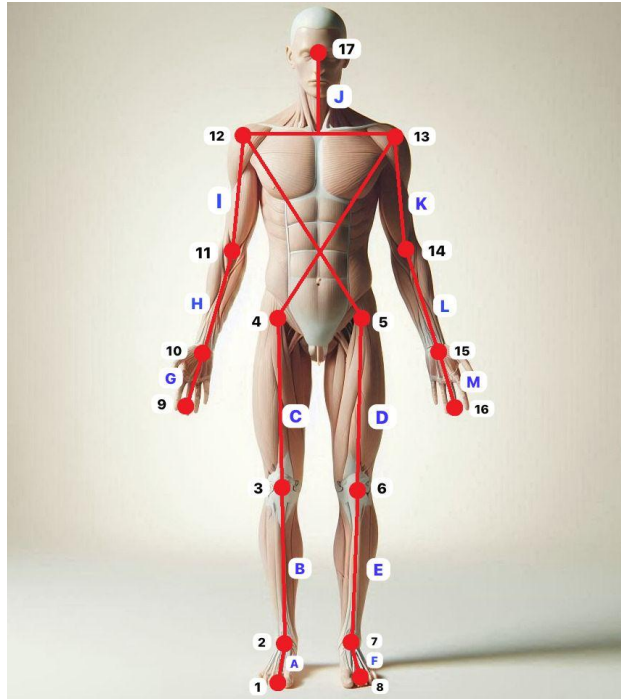


Figura 3.2 – Modelo del Cuerpo Humano. (articulaciones y segmentos)

Puntos articulares	Nombre articulación	Segmento	Nombre segmento	Punto Proximal	Punto Distal
1 y 8	Punta pie	A	Pie D	2	1
2 y 7	Tobillo	B	Pierna D	3	2
3 y 6	Rodilla	C	Muslo D	4	3
4 y 5	Cadera	D	Muslo I	5	6
9 y 16	Punta mano	E	Pierna I	6	7
10 y 15	Muñeca	F	Pie I	7	8
11 y 14	Codo	G	Mano D	10	9
12 y 13	Hombro	H	Antebrazo D	11	10
17	Entrecejo	I	Brazo D	12	11
		J	Cabeza	*	17
		K	Brazo I	13	14
		L	Antebrazo I	14	15
		M	Mano I	15	16

Tabla 3.2 - Descripción del Modelo del Cuerpo Humano. (articulaciones y segmentos)

Procedimientos

La recolección de datos se realizó durante el Campeonato Nacional Universitario de Atletismo, es el evento final para la temporada de los atletas universitarios en México. Cada atleta tuvo un previo calentamiento antes de ingresar a la zona de salto. El calentamiento es personalizado para cada atleta, puede variar entre 60 a 30 min. Usualmente incluye flexibilidad, movilidad de articulaciones y preparación muscular.

Durante el calentamiento se le colocó a cada atleta marcadores en puntos articulares específicos (cadera, tobillos, rodillas, hombros, muñecas, codos), los marcadores fueron colocados de tal forma que sean visibles desde el lado derecho en el plano sagital. Al mismo tiempo que los atletas calentaban se colocó el equipo de cámaras y marcadores como se especifica en el apartado de instrumentación.

Posteriormente, los atletas ingresaron a la zona de salto para que calentaran previo al inicio de la competencia. El tiempo que se les otorgó para el calentamiento en la zona fueron 60 min, en este calentamiento el atleta decide que hacer, pero el promedio es entre 4-7 saltos por atleta.

Durante la competencia se logró capturar 23 saltos de los 7 atletas, de los cuales 5 saltos no se completaron por lo que se descartaron del análisis. Se tomaron diferente número de saltos de cada atleta debido a que en la competencia se iban eliminando por no superar la varilla. El estudio se realizó en condiciones de una competencia normal, los atletas estaban dirigidos por sus entrenadores y el equipo de investigación no dio retroalimentación a los atletas o entrenadores.

En la figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo de los procedimientos mencionados.

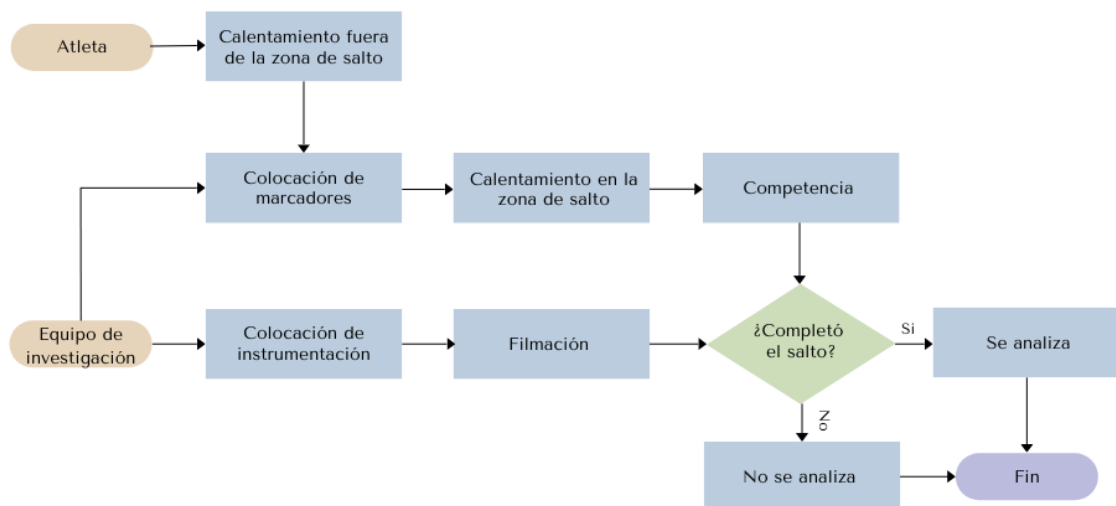


Figura 3.3 - Diagrama de Flujo de Procedimientos

Procesamiento de Datos

La fase de procesamiento de datos inicia en archivos de grabación predeterminados de cada cámara y termina en archivos de Excel.

El primer paso es la obtención de los fotogramas, dependiendo la cámara es el formato en el que se guarda el video y pueden ser editados o transformados solo en el software especializado de la cámara de cual se obtuvo el video. Estos archivos de video deben de ser transformados a un archivo que sea compatible con Kinovea, ya que es el software que vamos a utilizar para la digitalización de los puntos. Por lo tanto, los videos se transformaron a un archivo .avi o por sus siglas en ingles Audio Video Interlave, este tipo de archivo es muy común, por lo que todos los softwares especializados permiten la transformación de sus archivos a este y Kinovea igualmente permite trabajar con ellos.

Posterior a la obtención de fotogramas, con el software Kinovea se realiza la digitalización de los puntos que se van a analizar. Se divide en dos etapas, la primera etapa que es la segmentación de los fotogramas y la segunda etapa que es la obtención de coordenadas de los puntos.

La etapa de segmentación de fotogramas consiste en identificar el fotograma en el cual empieza y termina el gesto motor a analizar, por ejemplo, en la fase de despegue el fotograma donde inicia el gesto motor es el primer contacto con el suelo de nuestro pie de despegue y el fotograma donde termina es cuando el pie de despegue deja de estar en contacto con el suelo. Una vez identificando los fotogramas donde inicia y termina el gesto motor que se va a analizar, se segmenta esa parte y se descartan los fotogramas sobrantes.

En la etapa de obtención de coordenadas se puede realizar manualmente o con el uso de una herramienta de seguimiento del software, la ventaja que tiene este software es que cuenta con una herramienta de seguimiento y facilita la obtención de coordenadas. La herramienta de seguimiento es un algoritmo empleado en el procesamiento de imágenes, el cual se basa en la comparación de patrones. Se crean dos cuadros los cuales se pueden ajustar y comparten el mismo centro. El tamaño del primer cuadro debe de ser ajustado al tamaño de nuestro marcador y el centro debe estar en el píxel que queremos obtener las coordenadas. El segundo cuadro debe de ser de un tamaño más grande que el primer cuadro. Una vez definidos los cuadros, lo que hace el algoritmo es comparar estos dos cuadros en el fotograma siguiente y donde comparten las mismas tonalidades de píxeles del primer fotograma con el fotograma siguiente se posiciona el centro de los cuadros en el siguiente fotograma. Existen casos en el que la herramienta del seguimiento no es capaz de realizar su función a causa de ruidos en los fotogramas, sin embargo, el software permite mover manualmente el punto.

Una vez realizado el seguimiento en los puntos de interés, de cada fotograma se debe calibrar el sistema de coordenadas, esta calibración se realiza con una herramienta de calibración. Se selecciona dos puntos (píxeles) en un fotograma y se indica la distancia que existe entre estos dos puntos, con esta distancia el software escala el sistema de coordenadas. Para la calibración se utilizan los conos que se posicionaron con anterioridad como se describe en la sección de instrumentación. El software genera un archivo de Excel (.xlsx) con las coordenadas (x, y) escaladas de cada fotograma.

El archivo de Excel que genera el software Kinovea ordena los datos en tres columnas, con encabezados y los datos de cada punto de interés se ponen en estas columnas una debajo de la otra. La primera columna es el número de fotograma, la segunda columna es la coordenada en las abscisas y la tercera columna es la coordenada en las ordenadas. Se realiza un filtro manual para eliminar encabezados y ordenar en diferentes columnas las coordenadas de cada punto para su posterior análisis.

Finalmente, con el uso del software Wolfram Mathematica se realiza un código en el cual se leen los archivos de Excel que se generaron anteriormente, se hacen los cálculos de las variables biomecánicas y se genera un nuevo archivo Excel con los datos calculados además de graficas.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo del procesamiento de datos completo.

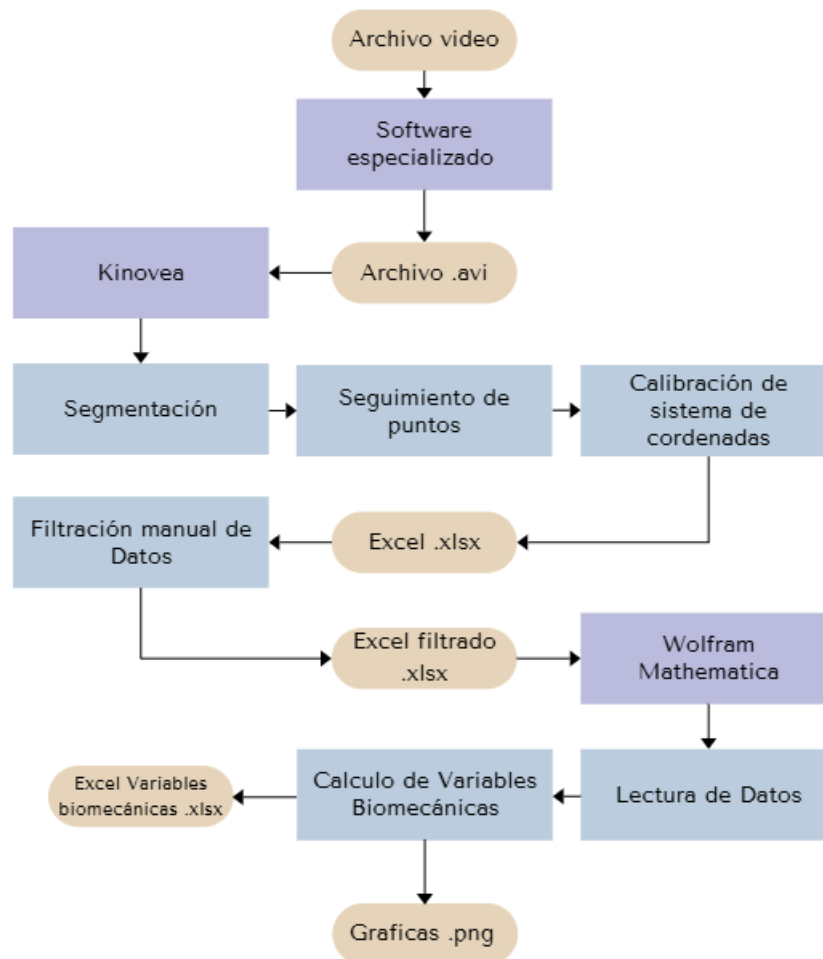


Figura 3.4 – Diagrama de Flujo de Procesamiento de Datos

Capítulo 4 – Análisis de datos

El estudio del gesto motor se realizó a partir de seis instantes, que son las siguientes:

1. Primer Contacto con el Suelo del Antepenúltimo Paso: se consideró como el cuadro donde se tiene el primer contacto del último tercer paso de la carrera.
2. Ultimo Contacto con el Suelo del Antepenúltimo Paso: se refiere al cuadro donde el antepenúltimo paso tiene contacto con el suelo.
3. Primer Contacto con el Suelo del Penúltimo Paso: es el cuadro donde se tiene el primer contacto del último segundo paso de la carrera.
4. Ultimo Contacto con el Suelo del Penúltimo Paso: el cuadro donde el penúltimo paso tiene contacto con el suelo.
5. Apoyo de garrocha: se estableció como el cuadro en donde la garrocha tiene su primer contacto con el cajetín.
6. Final: finaliza 0.0778 segundos (35 cuadros) después del primer contacto de la garrocha contra el cajetín

A partir de estos seis instantes, se establecieron cinco fases:

- A. Apoyo del Antepenúltimo Paso: esta fase comienza en el instante 1, finaliza en el instante 2.
- B. Vuelo Penúltima Zancada: comienza en el instante 2 y finaliza en el instante 3.
- C. Apoyo Penúltimo Paso: se considera desde el instante 3 hasta el instante 4.
- D. Ultima Zancada-Apoyo Garrocha: inicia en el instante 4 y finaliza en el instante 5.
- E. Fase inicial del despegue: instante 5 hasta el instante 6

La figura 4.1 es una gráfica del brazo y pierna derecha del atleta, donde se puede observar cada instante de distinto color y las fases con líneas punteadas entre los instantes con líneas punteadas.

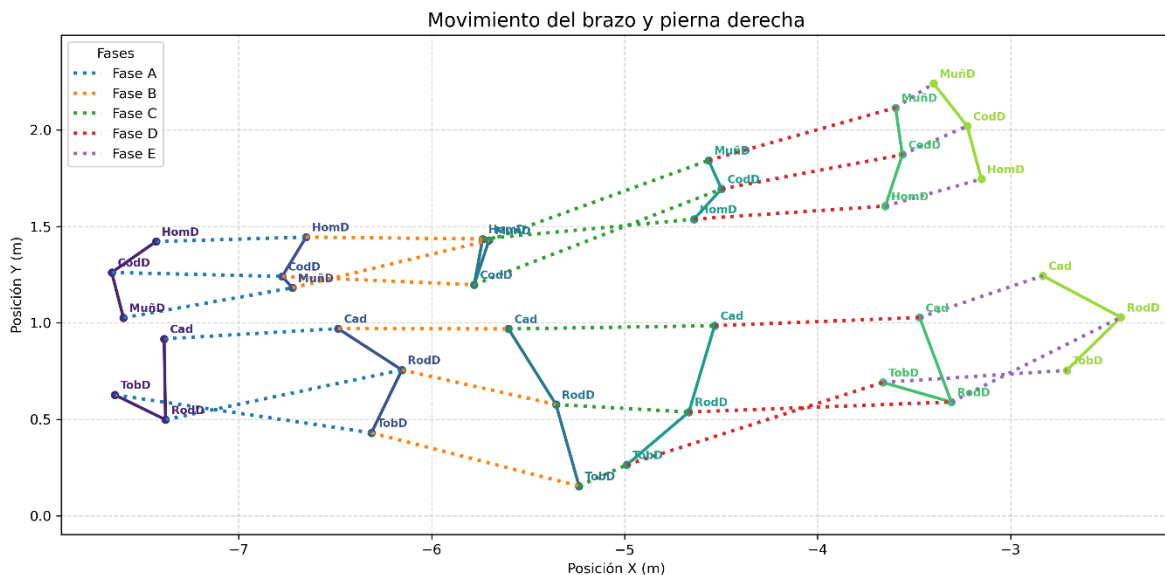


Figura 4.1 – Gráfica del Gesto Motor

El sistema de coordenadas que se establece es en dos dimensiones (x, y). La referencia utilizada para escalar el sistema bidimensional fueron dos conos a 2.25 metros de distancia entre ellos, el plano estudiado es el plano sagital del atleta donde destacan los movimientos de flexión y extensión del cuerpo humano. El origen del sistema de coordenadas para el eje vertical se posiciono al nivel del carril y para el eje horizontal en el final del cajetín de la zona de salto.

Debido a factores externos no controlables, se estudiaron solo las extremidades del lado derecho (muslo, pierna inferior, antebrazo, brazo superior).

Normalización De Muestras

Como cada salto entre atletas varia en tiempo, para poder comparar las muestras se normalizaron en porcentaje de ciclo, el ciclo comienza en el instante 1 ($t = 0$) y termina en el instante 6 (t_{Total}). Entonces el instante 1 es el 0% del ciclo y el instante 6 es el 100% del ciclo, para saber en qué momento del ciclo ocurre cada instante se toma el tiempo del instante que se quiere analizar y se divide entre el total del tiempo que dura el ciclo en ese salto

$$\%Instante_n = \frac{t_{Instante_n}}{t_{Total}}$$

Donde $t_{Instante_n}$ es el tiempo en el que ocurre ese instante y t_{Total} es el tiempo total del ciclo en ese salto.

Factores de Rendimiento

Como se estableció anteriormente nuestro criterio de rendimiento es la altura del salto, es decir el objetivo es que el atleta logre la mayor altura posible. Las fases que dividen a nuestro movimiento son últimos tres pasos, despegue y vuelo. Descartaremos la fase de vuelo y nos centraremos solo en las fases de los últimos tres pasos y el despegue.

Últimos Tres Pasos

En esta fase la variable de rendimiento es la velocidad. Los factores de rendimiento son la frecuencia, velocidad y amplitud de zancada, la posición del centro de masa contra la pisada y los ángulos articulares de los brazos.

En el cálculo para la amplitud de zancada, se consideró obtener la longitud de paso entre el antepenúltimo paso y el penúltimo paso. La medición se realizó mediante las coordenadas en el eje horizontal de la punta del pie en el cuadro del primer contacto del antepenúltimo paso (APP) y las coordenadas en el eje horizontal de la punta del pie en el cuadro del penúltimo paso en su primer contacto (PP).

$$Amplitud = x_{APP} - x_{PP}$$

Para la frecuencia se obtuvo el tiempo transcurrido entre cada paso, para definir el tiempo que tarda en completar la zancada.

$$f = \frac{1}{t}$$

$$t = n_{cuadros}(\Delta t)$$

La velocidad de zancada se calculó con el producto entre la amplitud de zancada y la frecuencia.

$$Velocidad = AmplitudZancada \cdot Frecuencia$$

En la relación del centro de masa con respecto a la pisada se utilizó la diferencia del punto articular de la cadera con respecto a la punta del pie en el suelo.

$$\Delta dx_{APP - Cad} = x_{APP} - x_{Cad}$$

$$\Delta dx_{PP - Cad} = x_{PP} - x_{Cad}$$

El ángulo articular del brazo derecho muñeca-codo-hombro se calculó de la siguiente manera con la ley de senos

$$a = \sqrt{(x_{codo} - x_{muñeca})^2 + (y_{codo} - y_{muñeca})^2}$$

$$b = \sqrt{(x_{muñeca} - x_{hombro})^2 + (y_{muñeca} - y_{hombro})^2}$$

$$c = \sqrt{(x_{hombro} - x_{codo})^2 + (y_{hombro} - y_{codo})^2}$$

$$B = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \right)$$

Donde, a es la distancia entre la articulación del codo y muñeca (Antebrazo).

b es la distancia entre la articulación la muñeca y el hombro.

c es la distancia entre la articulación del hombro y el codo. (Brazo Superior)

B es el ángulo entre los segmentos del antebrazo y la parte superior del brazo

Se evalúa el ángulo en cada cuadro para el cálculo de la velocidad angular, con el uso del del método del diferencial central del cálculo se obtiene la velocidad y aceleración angular.

$$\omega_i = \frac{\theta_{i+1} - \theta_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$\alpha_i = \frac{\omega_{i+1} - \omega_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$\alpha_i = \frac{\theta_{i+2} - 2\theta_i + \theta_{i-2}}{4(\Delta t)^2}$$

Las velocidad y aceleración lineal de los puntos articulares de los brazos al igual que con la velocidad angular se calculó utilizando el método diferencial central del calculo

$$Vx_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$ax_i = \frac{Vx_{i+1} - Vx_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$ax_i = \frac{x_{i+2} - 2x_i + x_{i-2}}{4(\Delta t)^2}$$

$$Vy_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$ay_i = \frac{Vy_{i+1} - Vy_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$ay_i = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{4(\Delta t)^2}$$

Despegue

La variable de rendimiento de esta fase es la altura de despegue. Los factores de rendimiento que se consideran son la velocidad de la rodilla contraria al despegue, la ubicación del centro de masa, el tiempo de contacto del pie de despegue con el suelo y la postura del cuerpo. Solo se evaluará la postura del cuerpo y la velocidad de la rodilla contraria al despegue, ya que no se pudo obtener datos del pie de despegue.

La postura del cuerpo se analiza en el momento en el que la garrocha hace contacto con el cajetín instante 6. Se registra la posición de los ángulos articulares de muñeca-codo-hombro, la altura de la muñeca, la inclinación del tronco y la distancia entre la muñeca-cadera del atleta.

La velocidad de la rodilla contraria al despegue se realizó el cálculo en las fases D y en la fase E que son las fases en la que se encuentra este instante. Se calculo utilizando el método diferencial del cálculo, mencionado anteriormente.

Velocidad y Aceleración Lineal CM

Se analizo las velocidades del centro de masa de cada extremidad derecha en las fases definidas anteriormente, el cálculo de las velocidades y aceleraciones de cada extremidad se realizó en base a su centro de masa. Para el cálculo del centro de masa se utilizaron los valores del porcentaje de la longitud del segmento desde el extremo distal (Pvalor) de la tabla 2.1 del capítulo 2.

$$\begin{aligned}
x_{cmMuslo} &= x_{Cadera} - [(x_{Rodilla} - x_{Cadera})(0.433)] \\
y_{cmMuslo} &= y_{Cadera} - [(y_{Rodilla} - y_{Cadera})(0.433)] \\
x_{cmPiernaInf} &= x_{Rodilla} - [(x_{Tobillo} - x_{Rodilla})(0.433)] \\
y_{cmPiernaInf} &= y_{Rodilla} - [(y_{Tobillo} - y_{Rodilla})(0.433)] \\
x_{cmAntebrazo} &= x_{Codo} - [(x_{Muñeca} - x_{Codo})(0.430)] \\
y_{cmAntebrazo} &= y_{Codo} - [(y_{Muñeca} - y_{Codo})(0.430)] \\
x_{cmBrazoSup} &= x_{Hombro} - [(x_{Codo} - x_{Hombro})(0.436)] \\
y_{cmBrazoSup} &= y_{Hombro} - [(y_{Codo} - y_{Hombro})(0.436)]
\end{aligned}$$

Después de obtener las posiciones del centro de masa de los segmentos en cada cuadro, se calculó el diferencial de distancia entre cuadros. El diferencial de tiempo se obtuvo con la tasa de captura (fps) con la que se tomó el video analizado. Con estos dos datos se realizaron los cálculos de velocidad y aceleración, utilizando el método del diferencial central del cálculo.

$$v_{x_i} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$v_{y_i} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2(\Delta t)}$$

$$v_i = \sqrt{v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2}$$

$$a_{x_i} = \frac{v_{x_{i+1}} - v_{x_{i-1}}}{2(\Delta t)}$$

$$a_{x_i} = \frac{x_{i+2} - 2x_i + x_{i-2}}{4(\Delta t)^2}$$

$$a_{y_i} = \frac{v_{y_{i+1}} - v_{y_{i-1}}}{2(\Delta t)}$$

$$a_{y_i} = \frac{y_{i+2} - 2y_i + y_{i-2}}{4(\Delta t)^2}$$

$$a_i = \sqrt{a_{x_i}^2 + a_{y_i}^2}$$

Donde, v_{x_i} y a_{x_i} son el vector de velocidad y aceleración del eje x en el instante/cuadro i .

v_{y_i} y a_{y_i} son el vector de velocidad del eje y en el instante/cuadro i .

v_i y a_i son la velocidad y aceleración en el instante/cuadro i .

x y y son las coordenadas del centro de masa del segmento que se está analizando, los subíndices $i + 1, i + 2, i - 1, i - 2$ se refiere al instante/cuadro anterior o posterior del instante/cuadro analizado.

Capítulo 5 – Resultados

La parte del gesto motor que se analizó inicia a partir del primer contacto con el suelo del antepenúltimo paso (tercer paso) y finaliza 0.0778 segundos (35 cuadros) después del primer contacto de la garrocha contra el cajetín.

Este segmento nos permite estudiar dos fases de nuestro criterio de rendimiento (altura del salto), los últimos tres pasos y la de despegue.

Tiempo Gesto Motor

Los tiempos del gesto motor varían entre saltos, el promedio para el tiempo en el que ocurre cada instante, al igual que el tiempo que dura cada fase de cada atleta se muestra en la tabla 5.1, Para una mejor visualización se graficó todo el ciclo en un 100% dividido por fases, grafica 5.1. El atleta A.A. no se consideró en la gráfica, ni en el resultado del promedio, ya que no se logró capturar el inicio del ciclo.

Atleta	A (s)	B (s)	C (s)	D (s)	E (s)	Total
A.A (1)	0.0666*	0.1400*	0.1467*	0.1555*	0.0778*	0.5867
A.G. (3)	0.1178	0.1170	0.1341	0.1333	0.0778	0.5800
E.H. (4)	0.1261	0.1361	0.1305	0.1411	0.0778	0.6117
L.M. (3)	0.1452	0.1274	0.1385	0.1533	0.0778	0.6422
J.P. (7)	0.1194	0.1117	0.1337	0.1003	0.0778	0.5429
Promedio	0.1252	0.1212	0.1339	0.1251	0.0778	0.5831

Tabla 5.1 – Tiempo de Duración de Cada Fase del Gesto Motor.

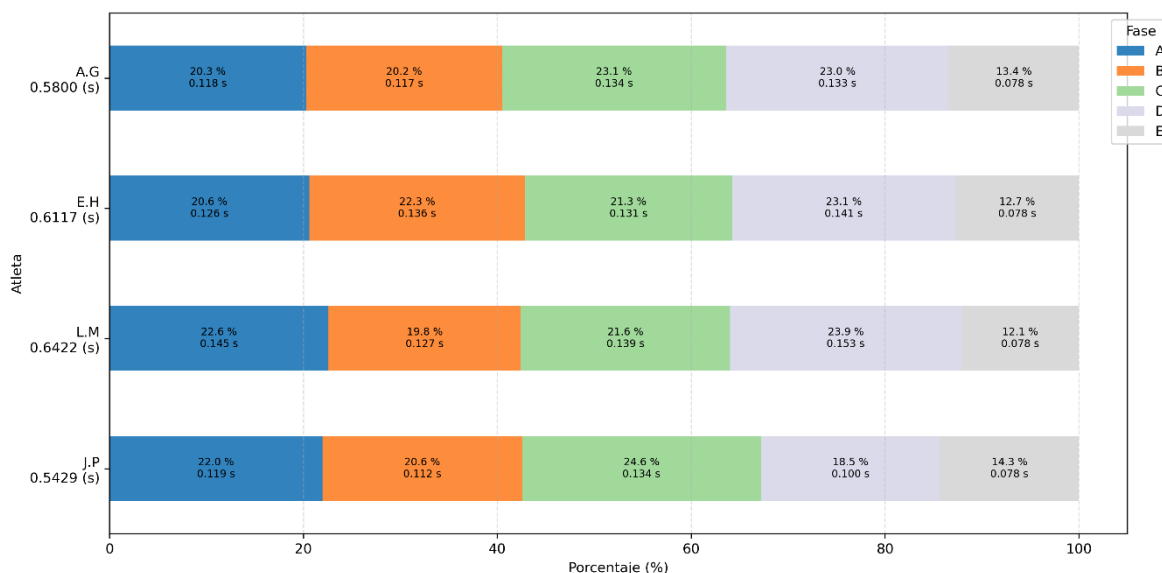


Figura 5.1 – Grafica de Barras de Cada Fase Normalizada a un 100%.

Últimos Tres Pasos

La zancada es uno de los factores de rendimiento de la velocidad (variable de rendimiento), en el estudio solo se fue posible visualizar el contacto con el suelo del antepenúltimo paso y del penúltimo paso. A continuación, se presentan en la figura 5.2 el promedio de la zancada del grupo de atletas analizado. En la tabla 5.2 se presentan las características promedio más importantes de la zancada del grupo de estudio. La figura 5.3 es una grafica de cajas de las características de la zancada para cada atleta.

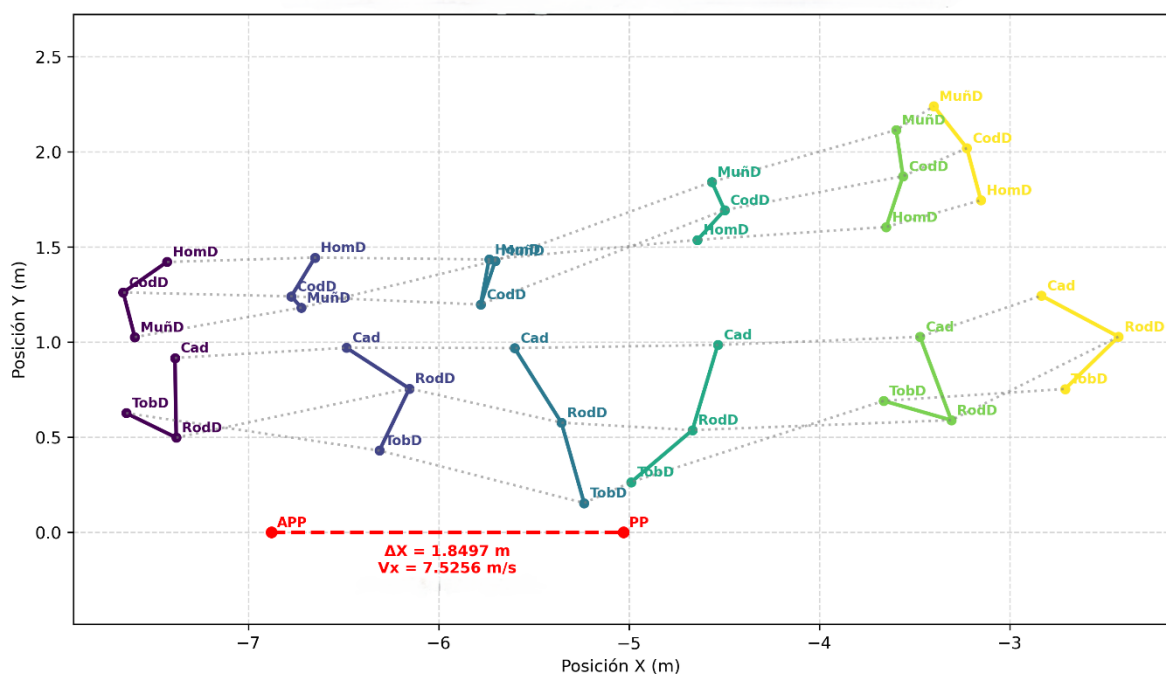


Figura 5.2 – Grafica del Promedio de la Zancada del Grupo de Estudio.

Atleta	Δdx APP-Cajón (m)	Δdx PP-Cajón (m)	Amplitud (m)	Tiempo (s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)
A.G. (3)	7.0037	5.1917	1.8120	0.2348	4.2603	7.7145
E.H. (4)	7.0465	5.0384	2.0082	0.2622	3.8152	7.6588
L.M. (3)	6.7036	4.8628	1.8408	0.2726	3.6747	6.7572
J.P. (7)	6.8063	5.0271	1.7792	0.2311	4.3425	7.6979
Promedio	6.8795	5.0298	1.8497	0.2464	4.0860	7.5256

Tabla 5.2 – Características de la Zancada.

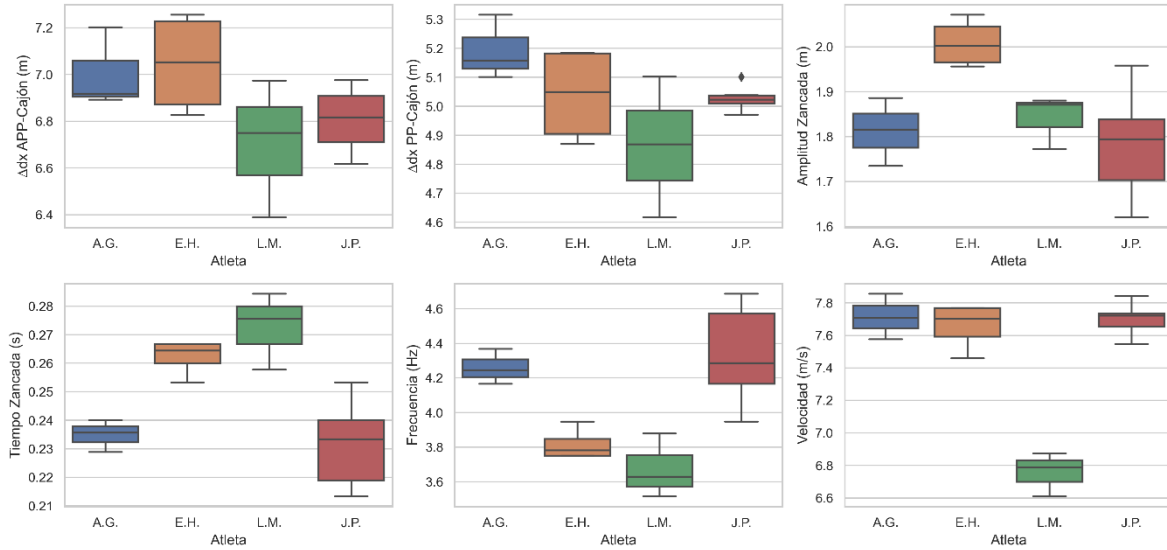


Figura 5.3 – Grafica de Cajas de la Zancada.

Se obtuvo el coeficiente de variabilidad, de cada variable por atleta presentados en la tabla 5.3. Con el objetivo de identificar la consistencia de cada atleta en estas variables. En la figura 5.4 se representan los coeficientes de variabilidad de cada variable en una gráfica de barras.

Atleta	CV Δdx APP-Cajón %	CV Δdx PP-Cajón %	CV Amplitud %	CV Tiempo %	CV Velocidad %
A.G. (3)	2.4577	2.1476	4.1810	2.3817	1.8153
E.H. (4)	3.1501	3.3370	2.7479	2.3969	1.9152
L.M. (3)	4.3979	4.9949	3.2534	4.9811	1.9950
J.P. (7)	2.0668	0.7934	6.7031	6.4740	1.2768

Tabla 5.3 – Coeficiente de Variabilidad de las Características de la Zancada.

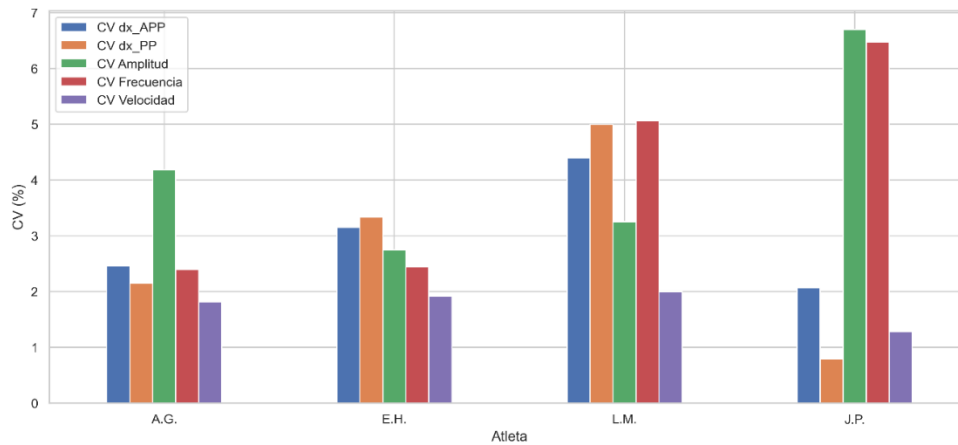


Figura 5.4 – Grafica de Barras del Coeficiente de Variabilidad la Zancada.

El siguiente factor de rendimiento es el centro de masa contra pisada, en la figura 5.5 se toma como centro de masa la cadera y con un punto rojo la punta del pie de apoyo. La tabla 5.4 muestra los promedios para el grupo de estudio de la diferencia de distancia entre el antepenúltimo paso con respecto a la cadera (Δdx APP-Cad) en el instante 1 y la diferencia de distancia del penúltimo paso con respecto a la cadera (Δdx PP-Cad) en el instante 3, así como la velocidad en horizontal de la cadera en la fase A y en la fase C, que es el momento cuando el pie está en apoyo con el suelo. Por último, en la figura 5.6 se presentan las gráficas de correlación de “ Δdx APP-Cad vs V_x Cad A” y “ Δdx PP-Cad vs V_x Cad C”

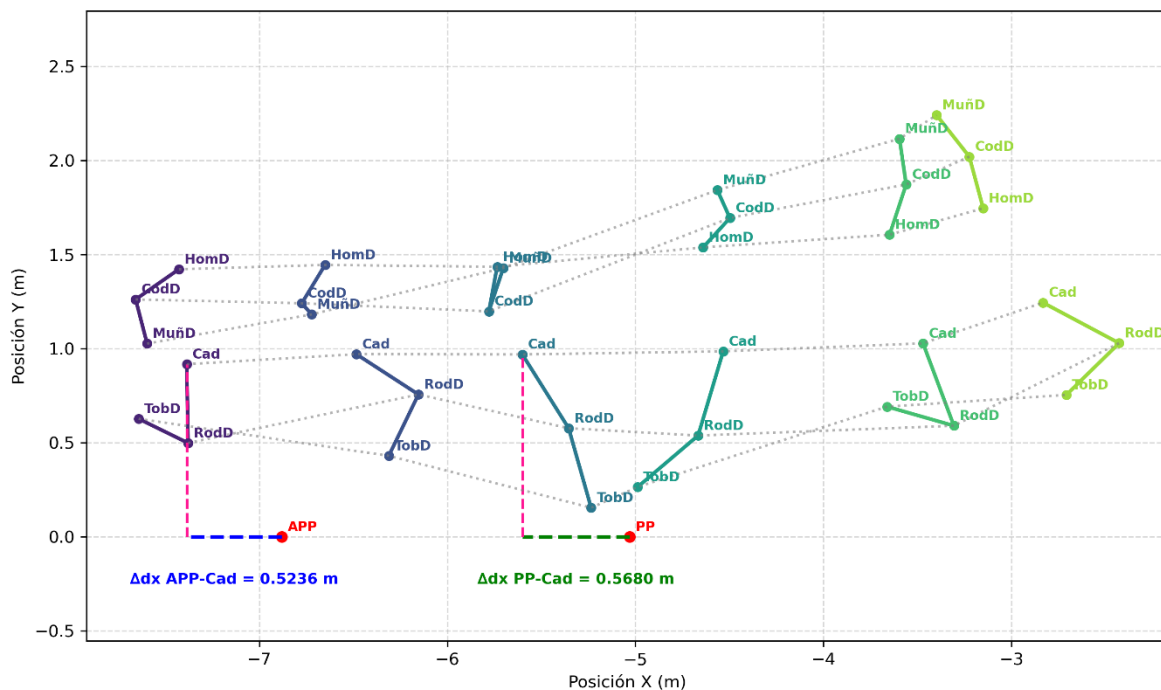


Figura 5.5 – Gráfica del Promedio del Grupo de Estudio de Δdx APP-Cad y Δdx PP-Cad.

Salto	Δdx APP-Cad (m)	V_x Cad A (m/s)	Δdx PP-Cad (m)	V_x Cad C (m/s)
A.G. (3)	0.4950	7.3299	0.5608	7.9778
E.H. (4)	0.5527	7.9325	0.5417	8.2043
L.M. (3)	0.5032	6.7088	0.5211	7.5296
J.P. (7)	0.5280	7.4541	0.6061	8.0688
Promedio	0.5236	7.4132	0.5680	7.9895

Tabla 5.4 – Características de Centro de Masa Contra Pisada.

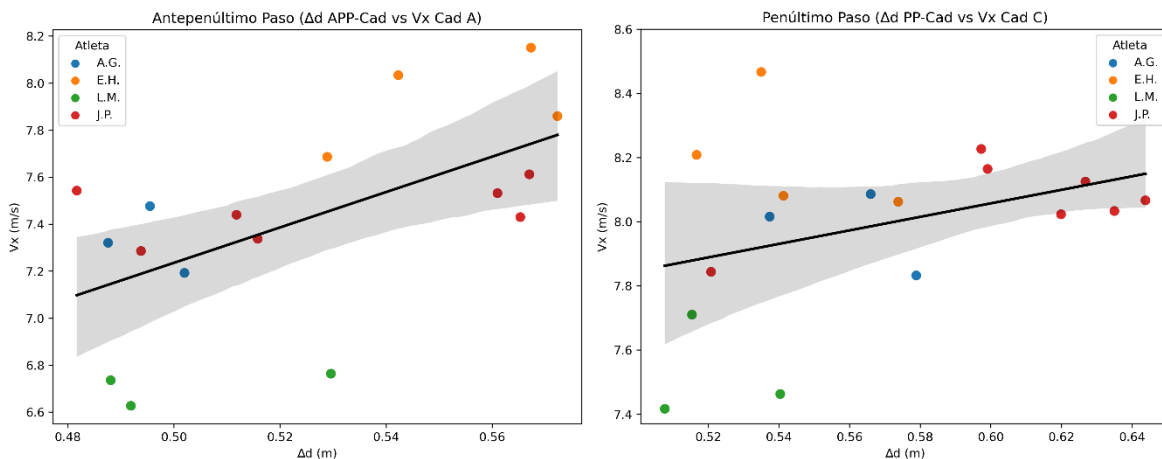


Figura 5.6 – Graficas de Correlaciones de “ Δdx APP-Cad vs Vx Cad A” y “ Δdx PP-Cad vs Vx Cad C”.

El último factor de rendimiento son los ángulos articulares de los brazos, figura 5.7. Se calcularon las velocidades, así como el ángulo en cada instante para cada atleta del brazo derecho. En las tablas 5.5 – 5.10 se muestran estos datos y en las figuras 5.8 – 5.13 se presentan las curvas de posición y velocidad angular del gesto motor.

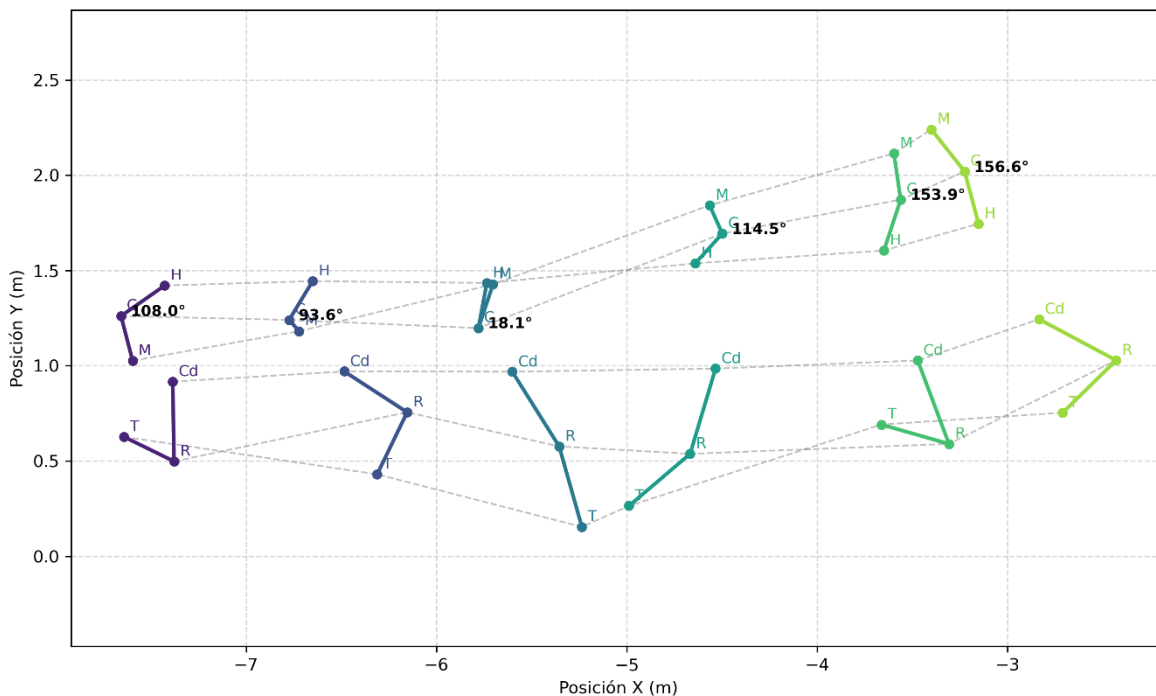


Figura 5.7 – Grafica del Promedio del Grupo de los Ángulos Articulares del Brazo Derecho

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
A.A. (1)	157.77*	320.47*	179.13	-1269.83	1.36	794.92	117.95	204.06	149.69	0.02	149.69

Tabla 5.5 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para A.A.

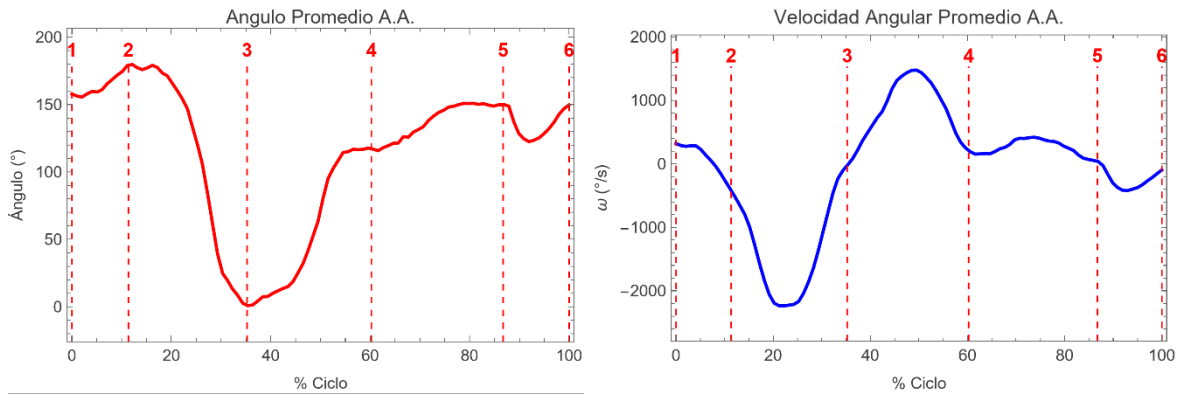


Figura 5.8 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para A.A.

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
A.G. (3)	111.55	405.60	159.32	-1266.31	11.58	956.76	139.52	85.35	151.07	25.37	153.04

Tabla 5.6 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para A.G.

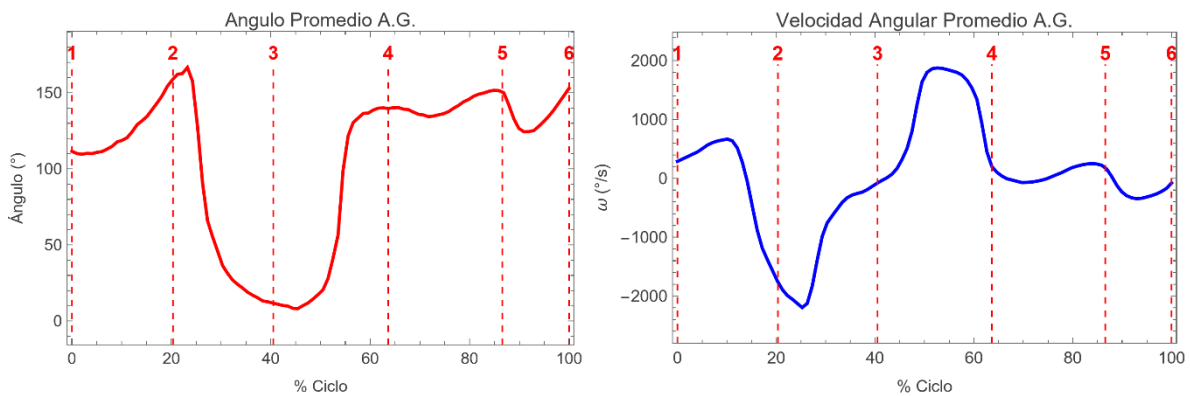


Figura 5.9 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para A.G.

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
E.H. (4)	109.92	-408.44	58.27	-317.26	14.69	587.94	91.20	437.40	152.71	-76.90	146.73

Tabla 5.7 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para E.H.

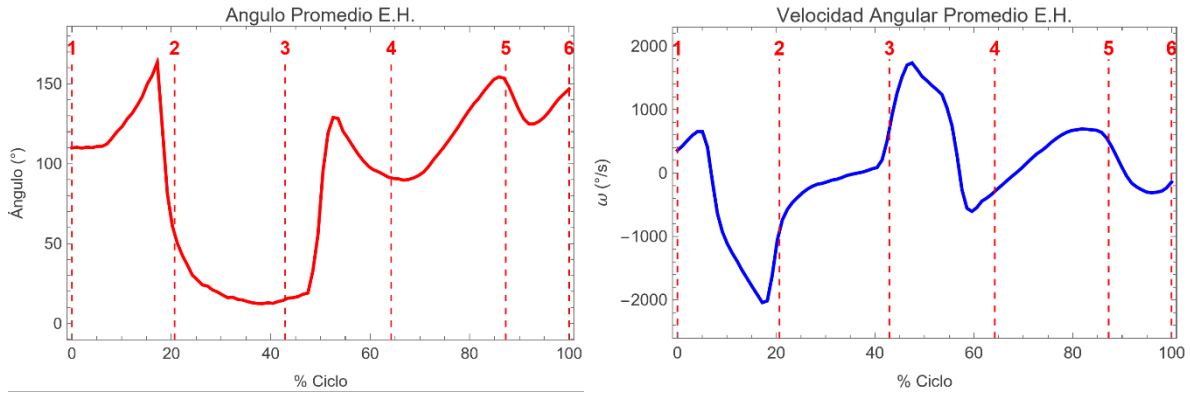


Figura 5.10 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para E.H.

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
L.M. (3)	105.85	-184.21	79.22	-583.45	4.77	778.20	112.35	240.14	148.41	-26.12	146.38

Tabla 5.8 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para L.M.

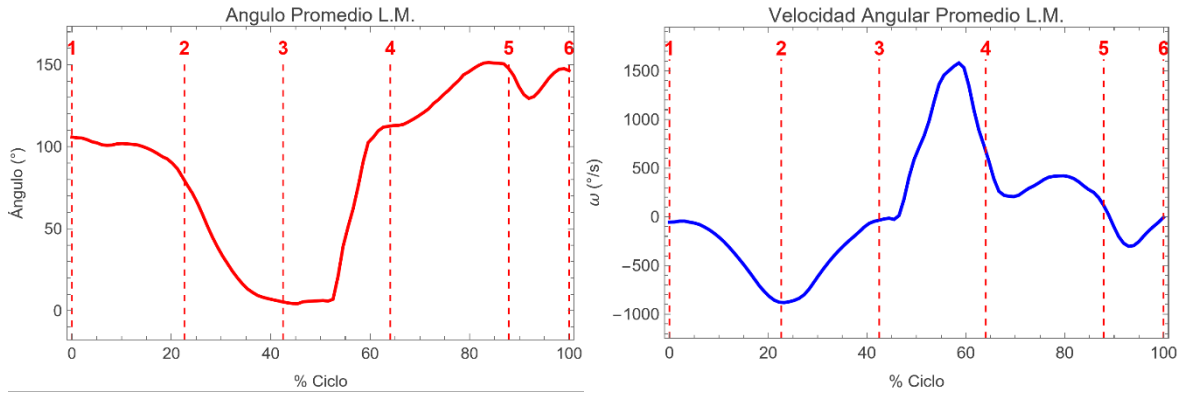


Figura 5.11 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para L.M.

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
J.P. (7)	106.27	-223.40	79.65	-432.38	31.00	646.40	117.51	421.55	158.73	134.61	169.20

Tabla 5.9 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para J.P.

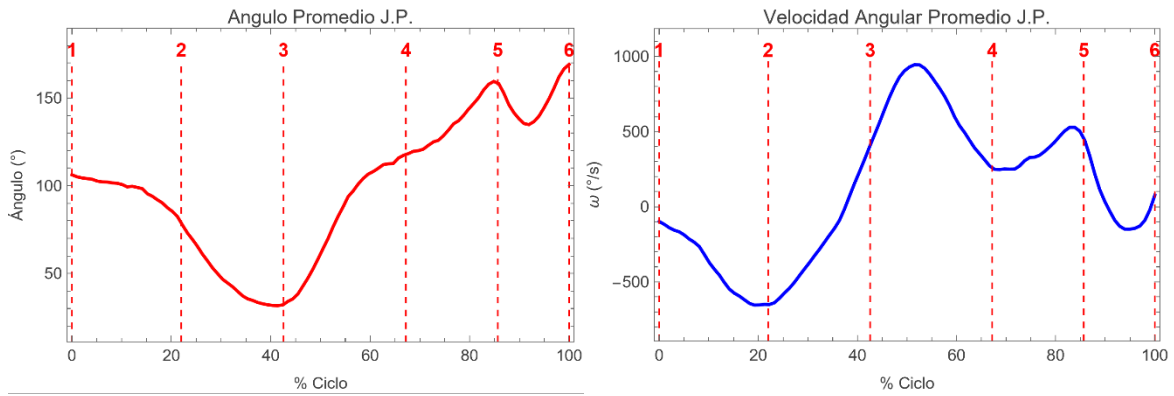


Figura 5.12 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para J.P.

Atleta	Angulo 1 (°)	ω A (°/s)	Angulo 2 (°)	ω B (°/s)	Angulo 3 (°)	ω C (°/s)	Angulo 4 (°)	ω D (°/s)	Angulo 5 (°)	ω E (°/s)	Angulo 6 (°)
Promedio	107.99	-149.02	93.63	-617.49	18.12	715.35	114.50	326.72	153.89	35.14	156.63

Tabla 5.10 – Promedio de Angulos Articulares en Cada Instante y Velocidades Angulares en Cada Fase para el Grupo.

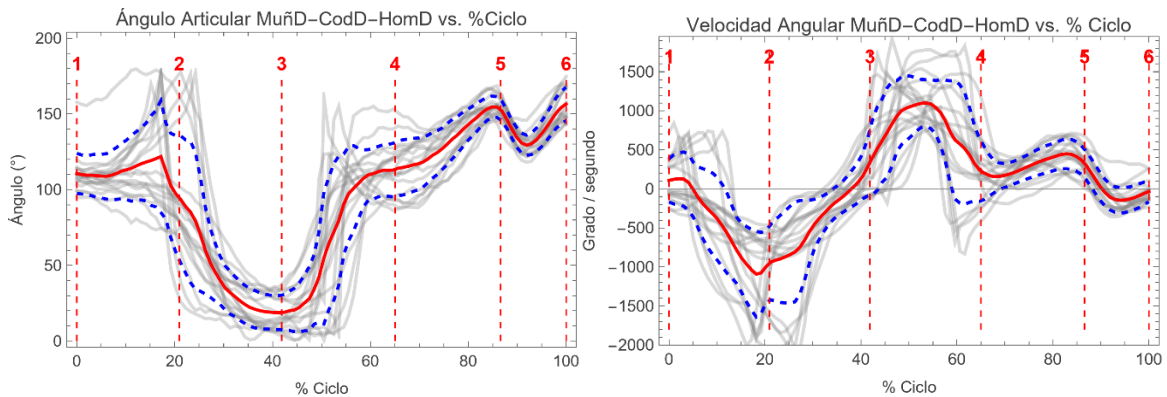


Figura 5.13 – Graficas Promedio del Angulo y Velocidad Angular en Todo el Ciclo para el Grupo.

A continuación, se presenta en las tablas 5.11 – 5.16 la velocidad (m/s) de cada fase en el eje x (horizontal) y en el eje y (vertical) de las articulaciones de muñeca derecha (MuñD), hombro derecho (HomD) y codo derecho (CodD). Además, en las figuras 5.14 – 5.19 se trazaron las curvas respectivas a la velocidad horizontal y vertical en cada instante del movimiento de estas tres articulaciones. MuñD color azul, CodD color rojo, HomD color verde.

A.A. (1)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	5.7099*	6.7914	7.7050	7.5920	5.7757
Vx CodD	6.8758*	7.0835	9.1285	7.2123	4.1483
Vx MuñD	6.4463*	8.2851	8.6411	7.1918	2.7016
Vy HomD	0.8505*	-0.0539	0.7838	0.7120	1.9846
Vy CodD	1.2612*	-1.1014	3.7653	1.3900	2.0123
Vy MuñD	1.7453*	1.7881	3.1365	2.0836	1.7583

Tabla 5.11 – Promedio de A.A. Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

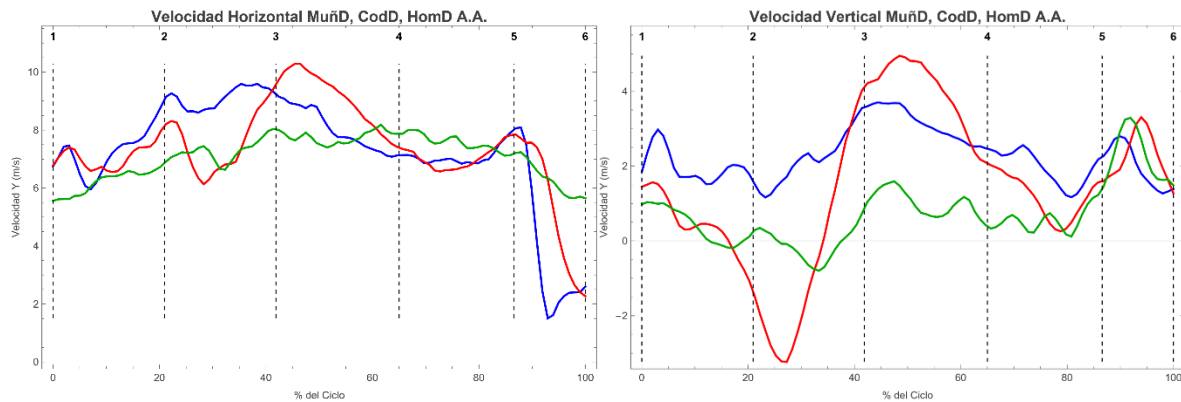


Figura 5.14 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para A.A.

A.G. (3)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	6.5241	7.4733	8.0611	8.2982	6.8891
Vx CodD	7.6872	8.2578	9.1090	8.3030	3.9712
Vx MuñD	7.0895	8.1917	9.1904	8.2421	1.9627
Vy HomD	0.4131	-0.3635	0.6804	0.5845	2.1171
Vy CodD	0.1610	-1.2411	4.1384	1.4951	2.1426
Vy MuñD	1.2511	1.7861	3.8129	1.7945	1.2365

Tabla 5.12 – Promedio de A.G. Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

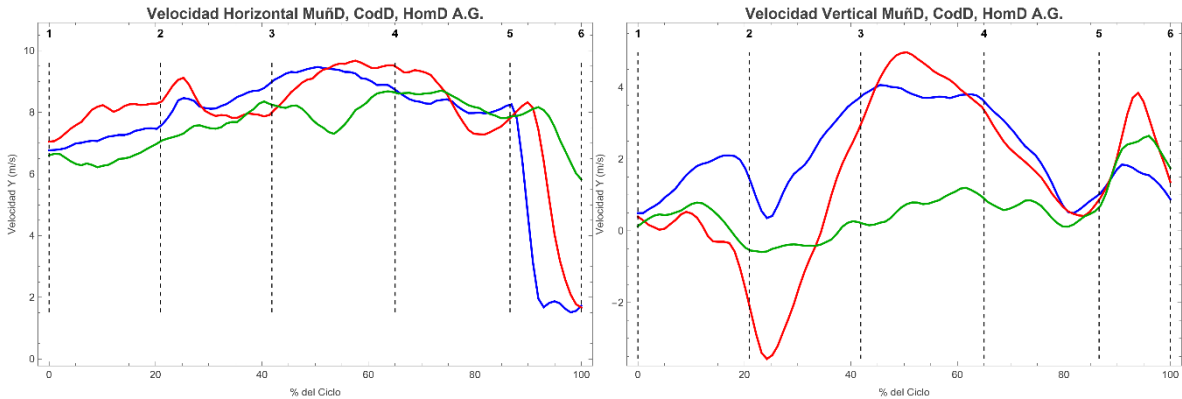


Figura 5.15 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para A.G.

E.H. (4)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	6.7163	7.7886	8.2843	8.0915	6.8799
Vx CodD	7.9466	7.6711	10.0055	7.6134	5.1224
Vx MuñD	7.0141	8.1121	8.5218	8.5371	3.0597
Vy HomD	-0.0886	0.3323	0.6965	0.3257	1.9114
Vy CodD	-0.7843	0.8242	3.7898	0.7111	2.0225
Vy MuñD	1.5155	2.2848	2.9143	1.6056	1.5590

Tabla 5.13 – Promedio de A.A. Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

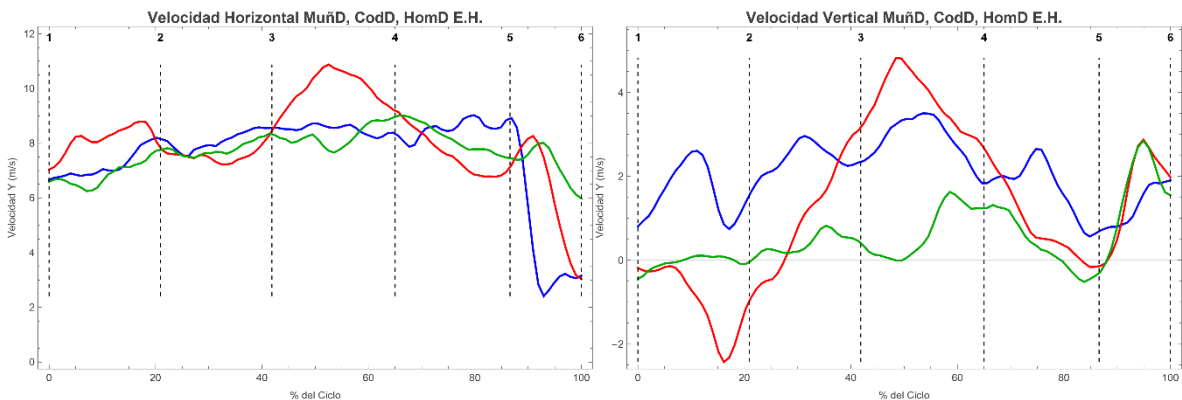


Figura 5.16 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para E.H.

L.M. (3)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	5.8523	6.8665	7.3035	7.3193	6.0658
Vx CodD	6.1620	7.5523	9.0284	7.1251	4.7300
Vx MuñD	6.3839	7.5192	7.5500	7.1080	3.1214
Vy HomD	0.3028	0.0301	0.4628	0.6862	1.8374
Vy CodD	0.1259	-0.3869	3.3354	1.6049	2.1055
Vy MuñD	1.3536	2.2669	2.6942	2.7029	1.4047

Tabla 5.14 – Promedio de L.M. Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

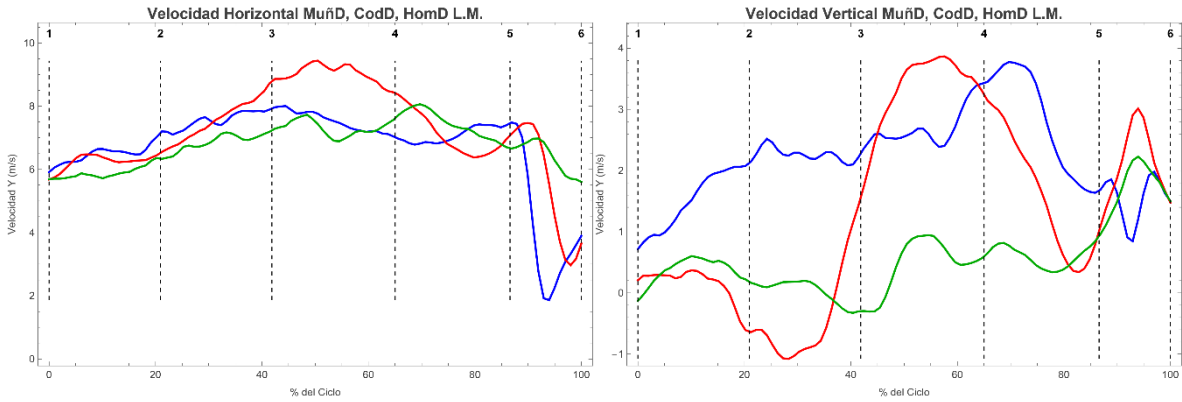


Figura 5.17 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para L.M.

J.P. (7)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	6.4276	7.7224	8.5292	7.7023	6.1404
Vx CodD	7.2250	8.9075	9.7195	6.8846	3.8534
Vx MuñD	7.7721	8.9829	8.4758	7.0198	2.2070
Vy HomD	0.1444	-0.2998	0.9760	0.5090	1.5697
Vy CodD	-0.2121	-0.6081	3.5929	1.7766	1.6161
Vy MuñD	1.0528	1.8695	3.0323	2.4365	1.8765

Tabla 5.15 – Promedio de J.P. Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

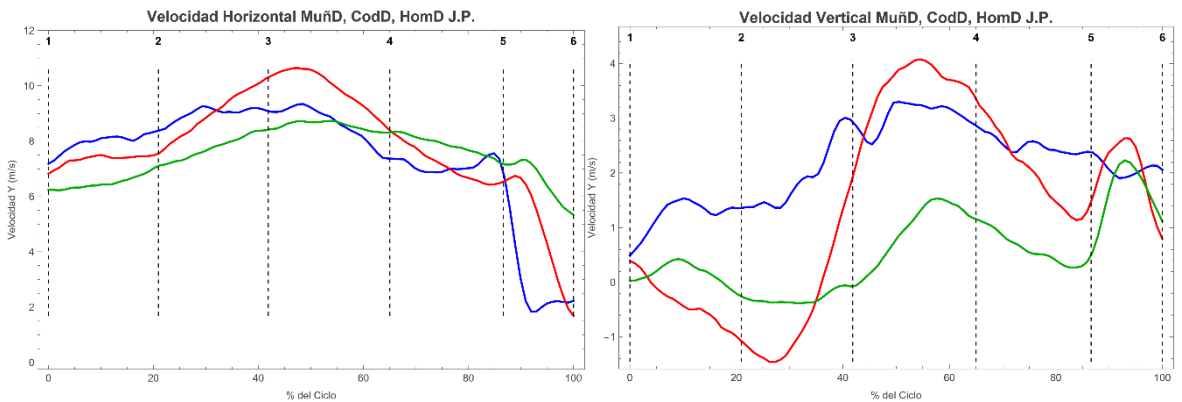


Figura 5.18 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para J.P.

Promedio (18)

Variable	A	B	C	D	E
Vx HomD	6.4110	7.5012	8.1467	7.8181	6.3968
Vx CodD	7.2888	8.1973	9.5333	7.3413	4.3175
Vx MuñD	7.2283	8.3748	8.4600	7.5849	2.5357
Vy HomD	0.1649	-0.1013	0.7684	0.5217	1.8045
Vy CodD	-0.2212	-0.3858	3.6942	1.4428	1.8978
Vy MuñD	1.2498	2.0096	3.0856	2.1697	1.6140

Tabla 5.16 – Promedio del Grupo Velocidad Horizontal y Vertical para MuñD, CodD, RodD en Cada Fase.

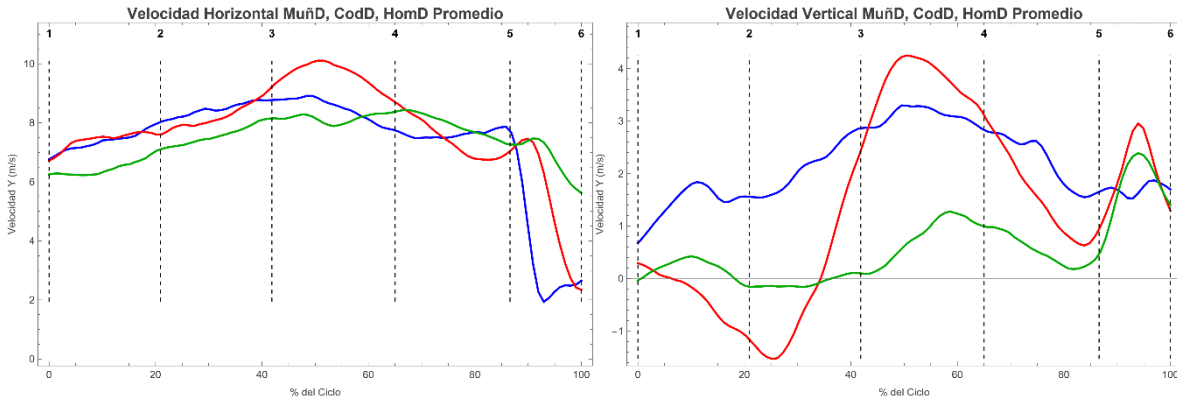


Figura 5.19 – Graficas Promedio de Velocidad Horizontal y Velocidad Vertical en Todo el Ciclo para el Grupo.

Despegue

En la fase de despegue el factor de rendimiento es la postura del cuerpo, en la tabla 5.17 se describen los parámetros que se consideran importantes en el instante en el que la garrocha tiene el primer contacto con el cajetín (5).

En la figura 5.20, se muestra la postura promedio del grupo, la inclinación del tronco con respecto al eje vertical y el ángulo promedio de la garrocha con respecto al suelo en el instante 5.

La figura 5.21 muestra la gráfica de cajas de los parámetros característicos para la postura del cuerpo.

Por último, en la tabla 5.18 se calcularon los coeficientes de variabilidad para los parámetros de la postura y en la figura 5.22 se representan en una gráfica de barras dichos coeficientes.

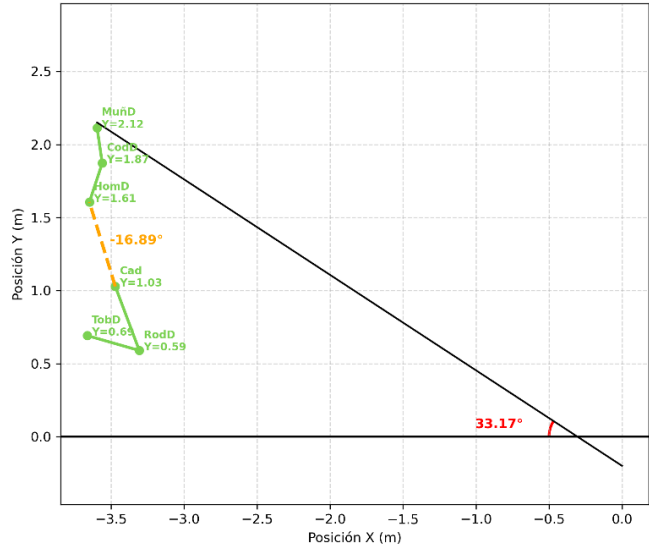


Figura 5.20 – Gráfica de la Postura y Ángulo de la Garrocha Promedio del Grupo en el Instante 5.

Atleta	Ángulo Despegue (°)	Inclinación Tronco (°)	Altura MuñD (m)	Altura Cad (m)	Angulo BrazoD (°)	Δx Cad-MuñD (m)	Δx Cajón-Cad (m)
A.A. (1)	33.3934	-16.4000	2.0776	0.9926	149.6908	0.1184	3.3845
A.G. (3)	32.5767	-15.5570	2.0768	1.0079	151.0736	-0.0610	3.5518
E.H. (4)	33.7042	-20.6158	2.0997	0.9813	152.7075	-0.1754	3.3205
L.M. (3)	36.8492	-21.5486	2.2923	1.0765	148.4114	-0.2298	3.1380
J.P. (7)	31.5133	-13.4173	2.0700	1.0473	158.7279	-0.0798	3.6774
Promedio	33.1711	-16.8945	2.1152	1.0279	153.8928	-0.1251	3.4710

Tabla 5.17 – Promedio de los Parámetros de Postura en el Instante 5.

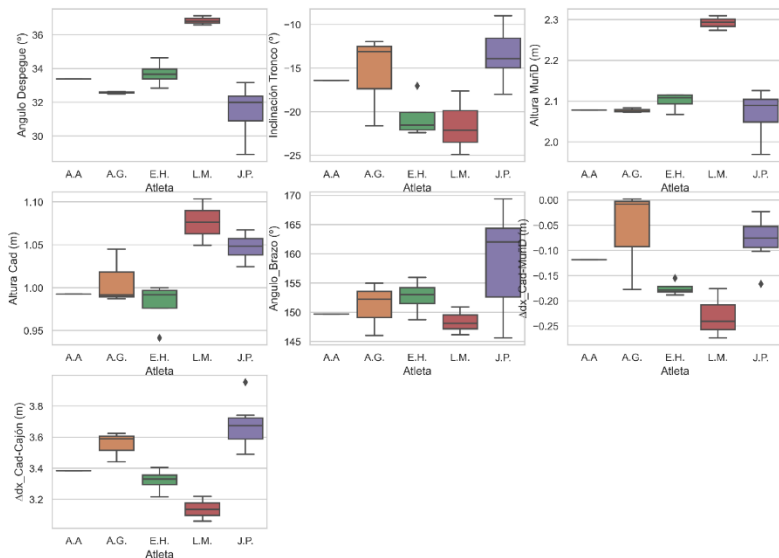


Figura 5.21 – Gráfica de Cajas de los Parámetros de Postura en el instante 5.

Atleta	CV Ángulo Despegue (%)	CV Inclinación Cad-HomD (%)	CV Altura MuñD (%)	CV Altura Cad (%)	CV Angulo Brazo (%)	Cv Δdx Cad-MuñD (m)	CV Δdx Cad-Cajón (%)
A.A. (1)	*	*	*	*	*	*	*
A.G. (3)	0.2371	33.9489	0.2706	3.1914	3.0290	164.945	2.7178
E.H. (4)	2.1923	11.9255	1.0756	2.7469	1.9748	8.2815	2.3687
L.M. (3)	0.7606	17.0214	0.7851	2.5131	1.6197	21.5990	2.5405
J.P. (7)	4.5156	23.2222	2.6322	1.4744	5.6706	59.6678	4.0842

Tabla 5.18 – Coeficiente de Variabilidad de los Parámetros de Postura en el Instante 5.

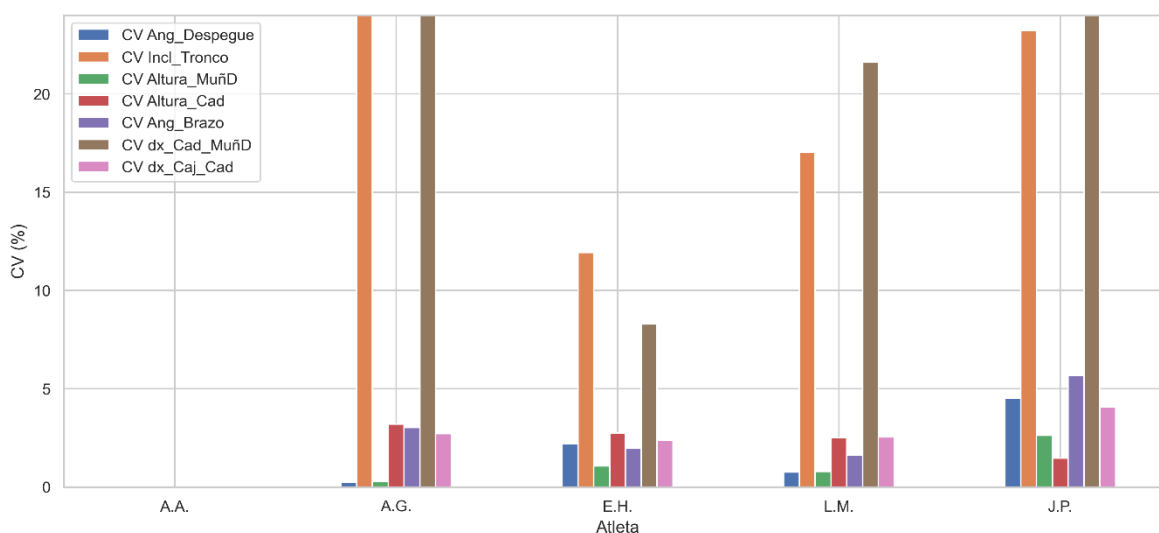


Figura 5.21 – Grafica de Barras del Coeficiente de Variabilidad de los Parámetros de Postura en el instante 5.

El siguiente factor de rendimiento es la velocidad de la rodilla contraria a la pierna de despegue (péndulo). A continuación, en la tabla 5.19 se presentan las velocidades y aceleraciones de la fase del despegue (D y E). En la figura 5.22 se realizó la gráfica de cajas de estos parámetros.

Atleta	Vx D (m/s)	Vx E (m/s)	Ax E (m/s ²)	Vy D (m/s)	Vy E (m/s)	Ay E (m/s ²)
A.A. (1)	10.6683	9.2315	-18.474	1.1752	6.2556	65.3186
A.G. (3)	10.9907	11.4631	6.0733	0.5745	5.4237	62.3470
E.H. (4)	10.6833	10.9449	3.3637	0.0587	6.0342	76.8275
L.M. (3)	10.4593	9.1774	-16.4815	0.9565	5.8205	62.5372
J.P. (7)	10.7093	12.6283	24.6736	0.0170	5.3534	68.6113
Promedio	10.7065	11.2962	7.58173	0.3401	5.6444	68.1978

Tabla 5.19 – Velocidad de RodD en las Fase D, Velocidad y Aceleración de RodD en la Fase E.

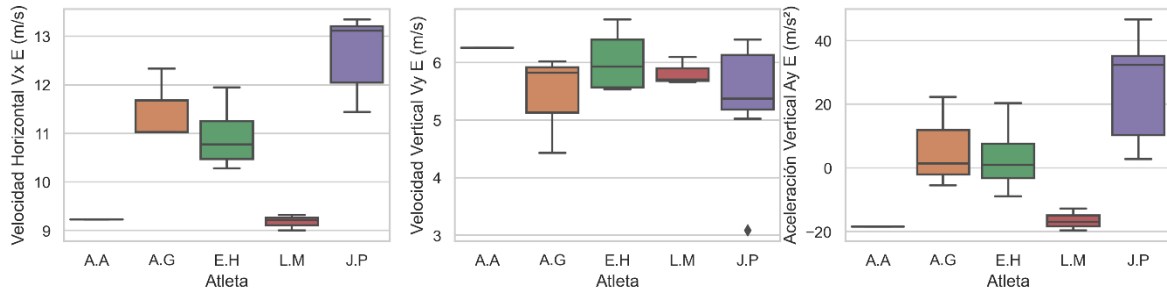


Figura 5.22 – Grafica de Cajas de los Parámetros de Despegue de RodD en la Fase D y E.

En la figura 5.23 se realizaron dos correlaciones, para visualizar el comportamiento de la pierna de péndulo. La primera correlación es la velocidad vertical de RodD en la fase E ($Vy E$) vs la aceleración vertical de RodD en la fase E ($Ay E$). La segunda correlación es la diferencia de velocidad horizontal de RodD en la fase D – velocidad horizontal de RodD en la fase E (ΔVx) vs diferencia de velocidad vertical de RodD en la fase D – velocidad vertical de RodD en la fase E (ΔVy).

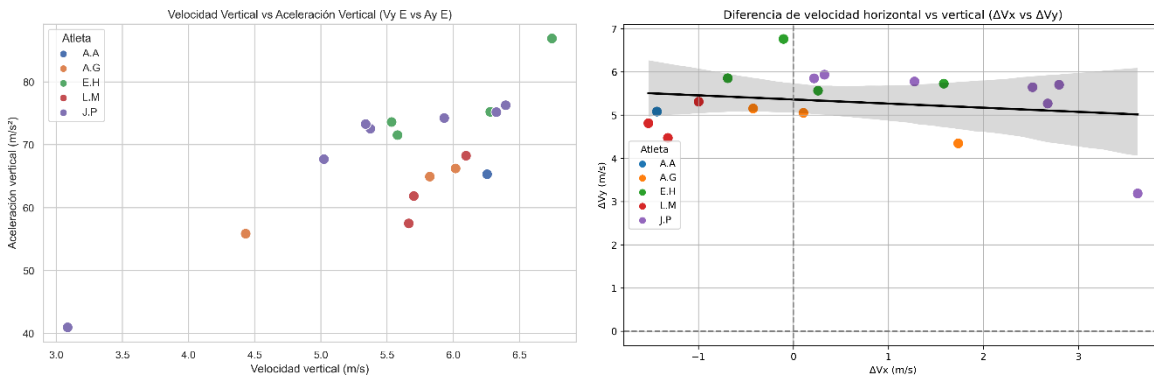
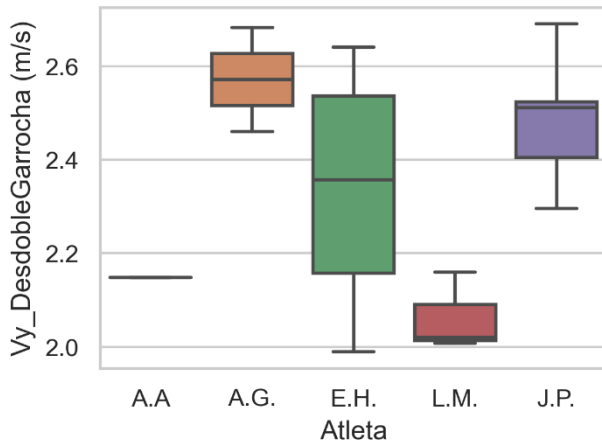


Figura 5.23 – Grafica de Correlaciones de “ $Vy E$ vs $Ay E$ ” y “ ΔVx vs ΔVy ”

Correlaciones Variable de Rendimiento

A partir del análisis realizado, de la fase de los últimos tres pasos y el despegue. Se decidió para determinar la transferencia de energía hacia la garrocha como variable de rendimiento la velocidad vertical con la que la garrocha se extiende desde su máxima flexión hasta que vuelve a extenderse completamente (V_y DG). En la tabla 5.20 se muestra la velocidad vertical promedio de la extensión de la garrocha para cada atleta y en la figura 5.24 su grafica de cajas.



Atleta	V_y DG (m/s)
A.A. (1)	2.1483
A.G. (3)	2.5944
E.H. (3)	2.2342
L.M. (3)	2.0621
J.P. (7)	2.4788
Promedio	2.3630

Tabla 5.20 – Promedio V_y DG

Figura 5.24 – Gráfica de Cajas de V_y DG

Se realizó una matriz de correlación, con la variable de rendimiento y algunas de las variables previamente presentadas. Se tomaron 7 variables de posición en el instante de apoyo de la garrocha (instante 5) y 12 variables de velocidad y 2 variables aceleración en la Fase D y E.

VARIABLES DE POSICIÓN: ángulo de despegue, inclinación del tronco, altura de la muñeca, altura de la cadera, Δx cajón-cadera, ángulo del brazo derecho y Δx cadera-muñeca derecha.

VARIABLES EN LA FASE D: velocidad horizontal y vertical de rodilla de péndulo, velocidad horizontal y vertical de muñeca derecha y velocidad angular del brazo derecho.

VARIABLES EN LA FASE E: velocidad y aceleración horizontal, así como vertical de rodilla de péndulo, velocidad y aceleración horizontal, así como vertical de muñeca derecha y velocidad angular del brazo derecho.

La figura 5.25 es la matriz de correlación para todas las variables. La figura 5.26 muestra la correlación de V_y DG con todas las variables, que son los valores de la fila 1 o columna 1 de la matriz de correlación.

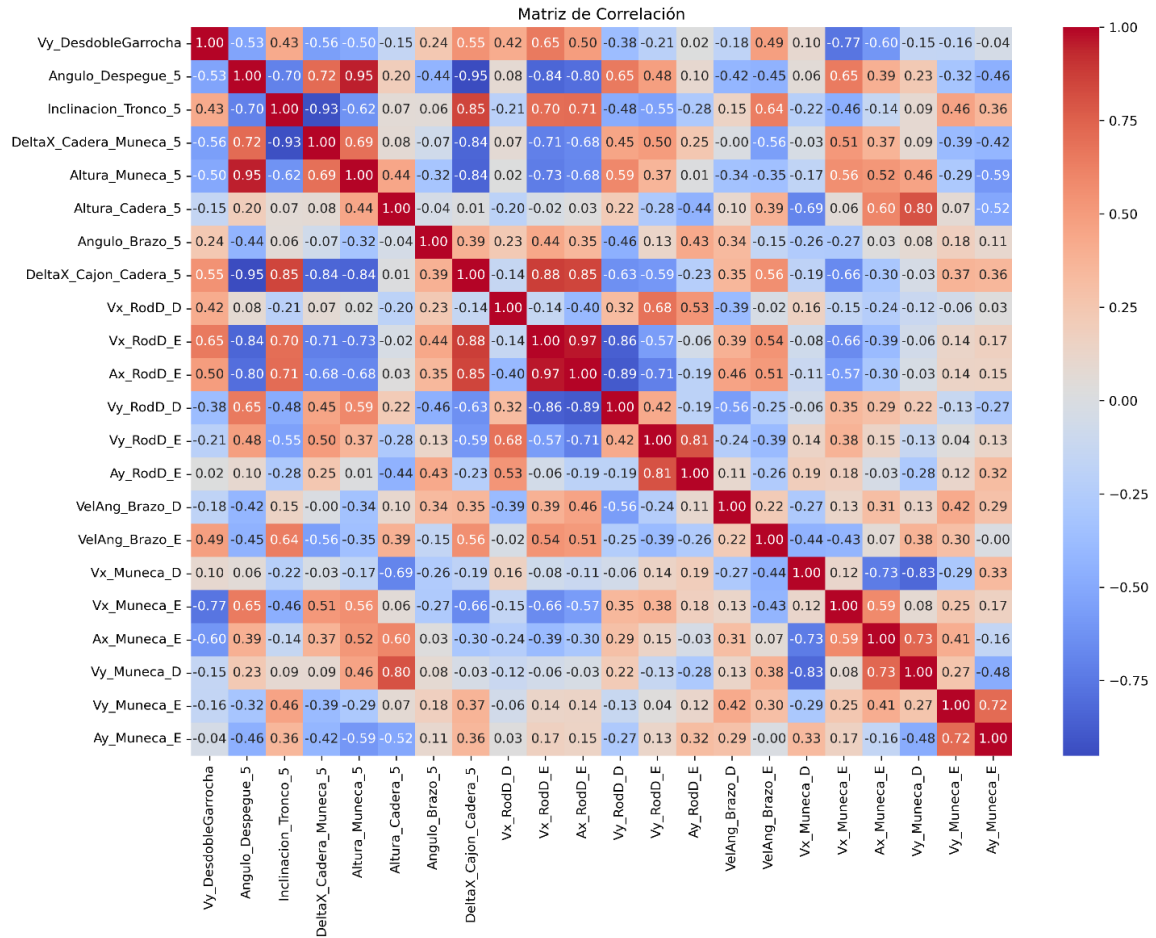


Figura 5.25 – Matriz de Correlación de Todas las Variables

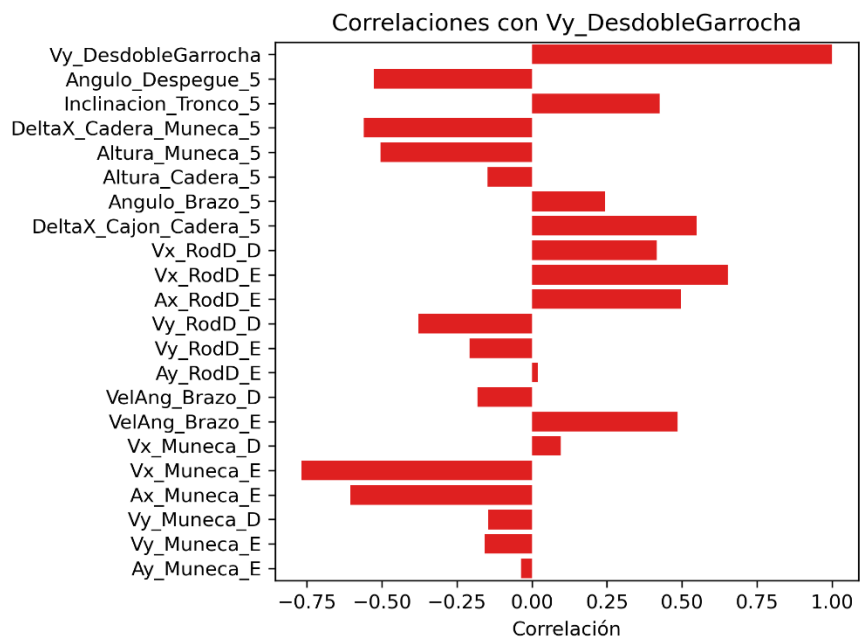


Figura 5.26 – Grafica de Barras de Correlación de Vy DG vs Todas las Variables

Trayectorias Gesto Motor

En esta sección se presentan en las figuras 5.27 – 5.29 las curvas de las trayectorias promedio en 2D, con sus bandas de desviación estándar para cada atleta. Las curvas en color gris son para las articulaciones (TobD, RodD, Cad, HomD, CodD, MuñD), las curvas de color son para los centros de masa de cada segmento (AnteBrazo, BrazoSuperior, Muslo, PiernaInferior).

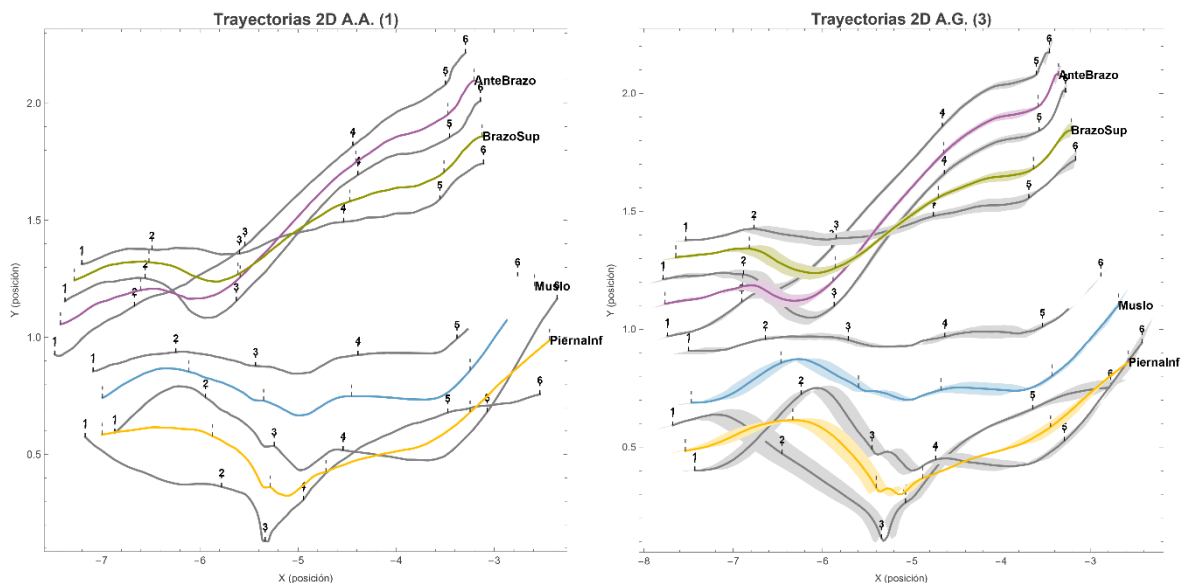


Figura 5.27 – Graficas de las Trayectorias de los Atletas A.A. y A.G.

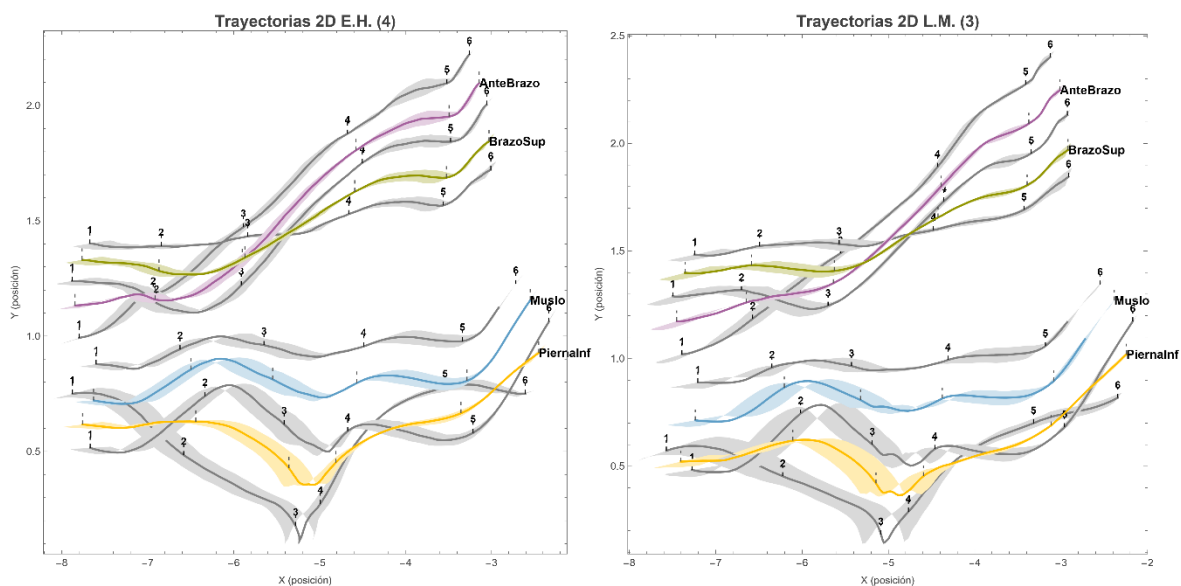


Figura 5.28 – Graficas de las Trayectorias de los Atletas E.H. y L.M.

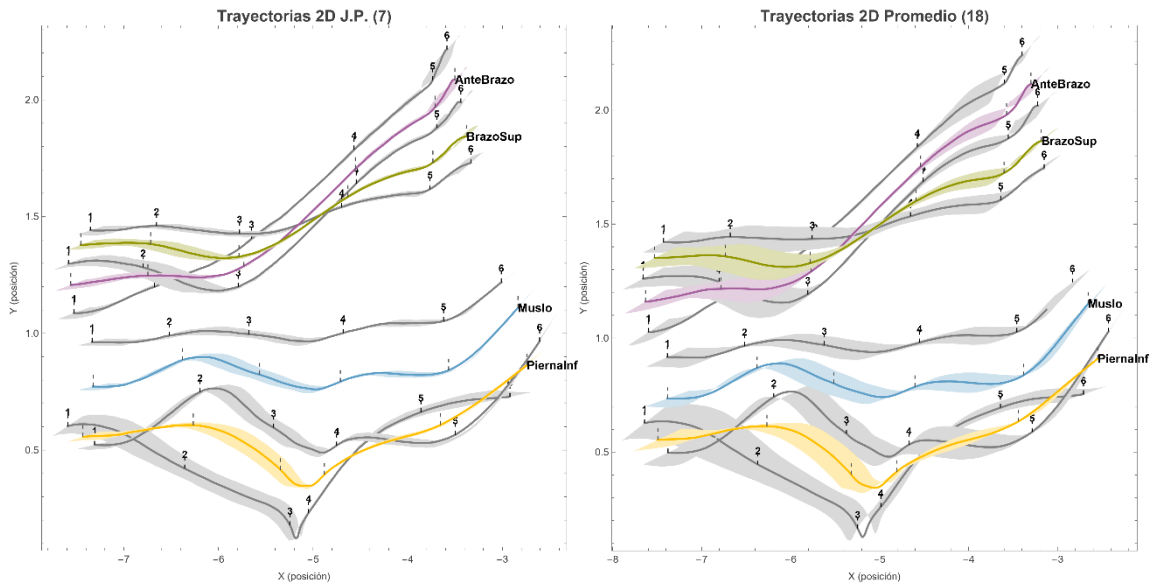


Figura 5.29 – Graficas de las Trayectorias del atleta J.P. y del Grupo de Estudio.

Velocidad Gesto Motor

Se calcularon las velocidades horizontales y verticales para el centro de masa de cada segmento mencionados anteriormente durante todo el ciclo. A continuación, se muestran en las figuras 5.30 – 5.35 las gráficas de las velocidades horizontales y verticales. La curva de color azul es la velocidad del Muslo, la curva de color rojo es la velocidad de la PiernaInferior, la curva de color verde es la velocidad del AnteBrazo y la curva de color morado es la velocidad de BrazoSuperior.

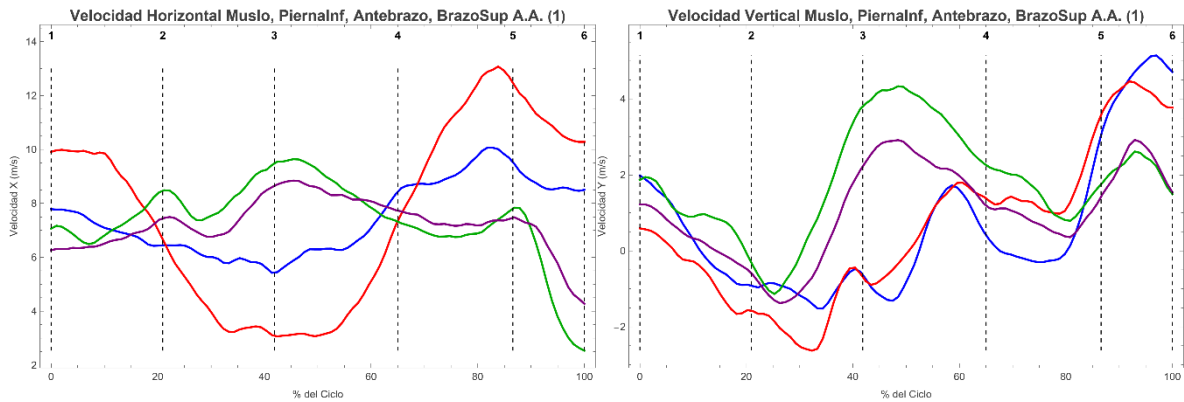


Figura 5.30 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del atleta A.A.

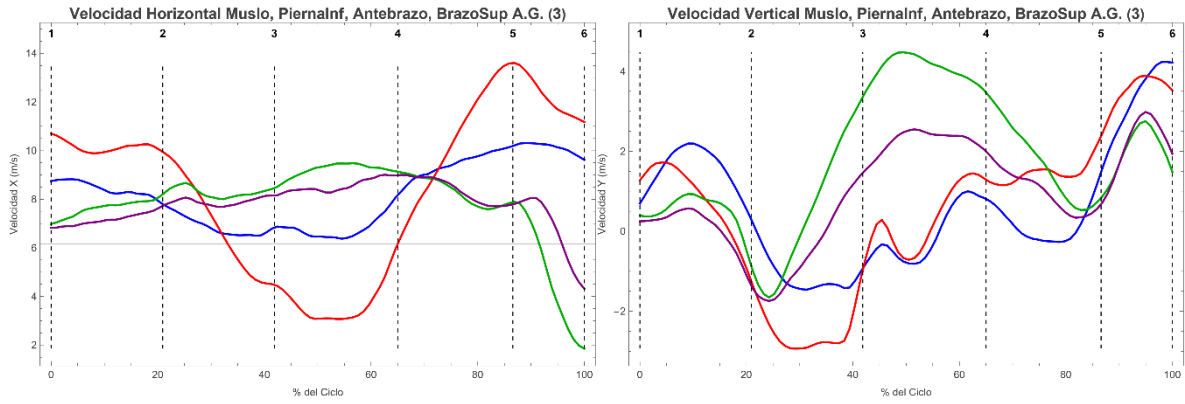


Figura 5.31 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del atleta A.G.

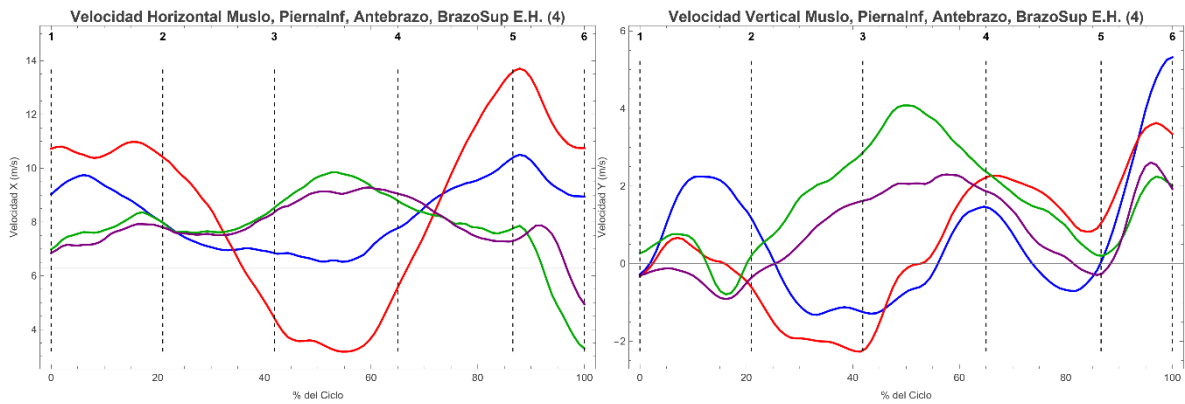


Figura 5.32 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del atleta E.H.

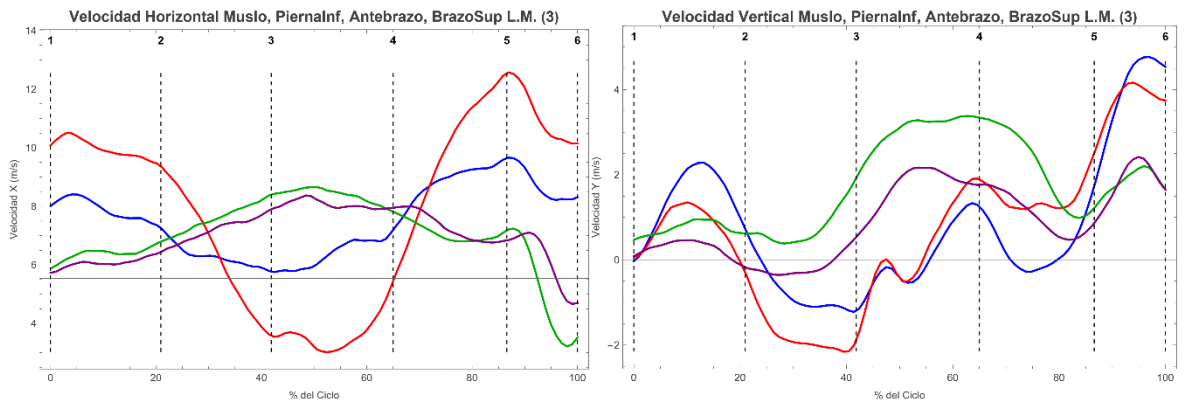


Figura 5.33 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del atleta L.M.

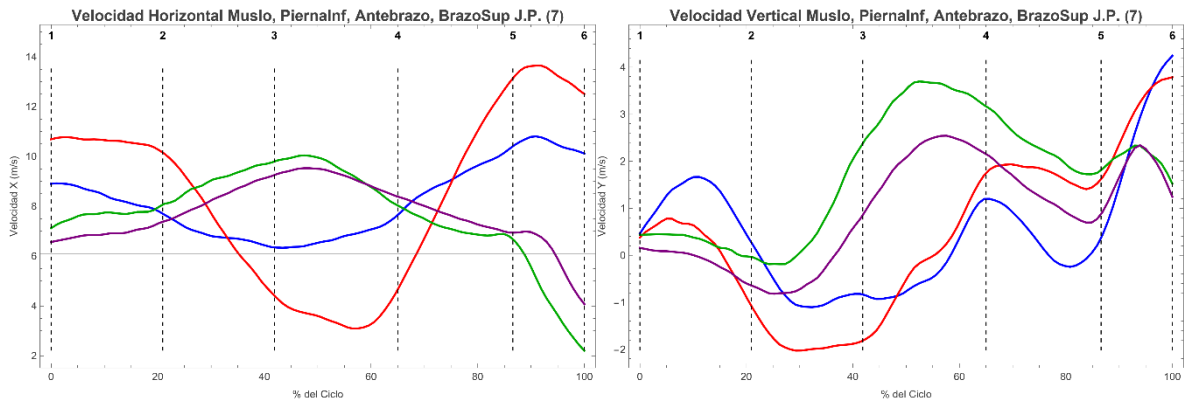


Figura 5.34 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del atleta J.P.

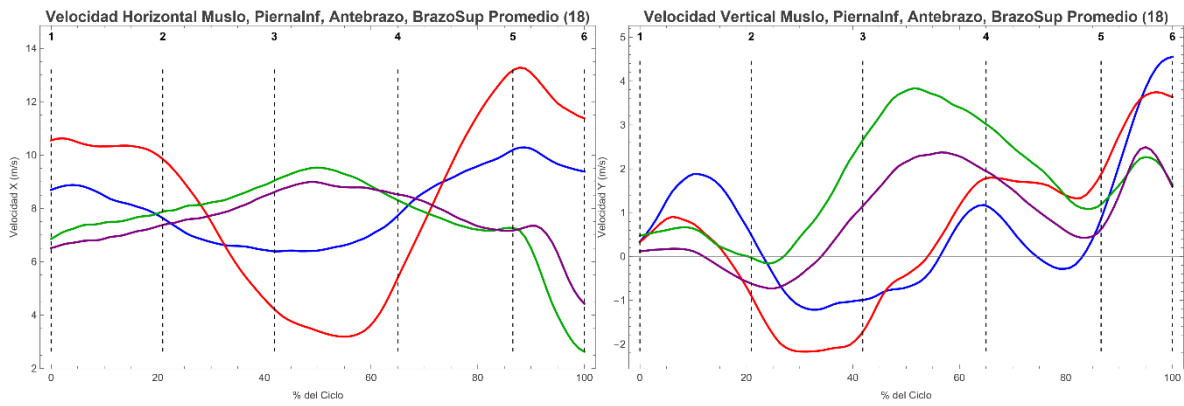


Figura 5.35 – Graficas de Velocidad Horizontal y Vertical durante Todo el Ciclo del Grupo de Estudio.

Capítulo 6 – Discusión

En este capítulo se discutirán los resultados, se realizará un análisis detallado de cada gráfica y tabla presentada en el capítulo anterior, siguiendo la misma estructura con la que se fueron presentando los resultados. Posteriormente se mencionarán las limitaciones que se presentaron para el estudio y las causas que provocaron dichas limitaciones. Finalmente se presentarán las investigaciones a futuro, que surgen a partir de la discusión y las limitaciones.

Discusión de resultados

Tiempo Gesto Motor

El tiempo promedio del gesto motor es de $0.5831 \text{ s} \pm 0.04$. El atleta con el tiempo más corto es J.P. con un promedio de 0.5429 s . El atleta con el tiempo más largo es L.M. con 0.6422 s . (Tabla 5.1)

Todos los atletas tienen mayor tiempo de apoyo en el penúltimo paso (Fase C) a comparación del apoyo del antepenúltimo paso (Fase A), a excepción del atleta L.M. que apoya más en el antepenúltimo paso (Fase A) que en el penúltimo (Fase C). En la Figura 5.1 se visualiza este comportamiento.

El vuelo de la penúltima zancada (Fase B) es menor que las fases de apoyo del penúltimo y antepenúltimo paso (Fase A y C) para casi todos los atletas. El atleta que no cumple con esto es E.H., la fase de vuelo de la penúltima zancada (Fase B) es mayor que la fase de apoyo del penúltimo y antepenúltimo paso (Fase A y C). Como se puede apreciar en la Figura 5.1

Últimos Tres Pasos

El primer factor de rendimiento que se analizó fue la penúltima zancada, no se logró realizar el análisis de la última zancada ya que no se pudo capturar datos del último paso.

La amplitud de la penúltima zancada entre los atletas promedia en 1.85 m . El atleta con la zancada más larga es el atleta E.H. su promedio se encuentra 0.15 m por encima de la media. La zancada más corta es J.P. con un promedio de 0.07 m por debajo de la media. Los atletas A.G. y L.M. se encuentra alrededor de la media. (Tabla 5.2.)

En la característica de frecuencia el promedio es de 4.08 Hz . Frecuencia más baja es para el atleta L.M. con una frecuencia promedio de 3.67 Hz . La frecuencia más alta es de J.P. con una frecuencia promedio de 4.34 Hz , seguido muy cerca de A.G. con una frecuencia de 4.26 Hz . En el intermedio se encuentra E.H. con una frecuencia promedio de 3.81 Hz . (Tabla 5.2.)

La velocidad promedio del grupo en la penúltima zancada es de 7.53 m/s . Los atletas A.G., E.H. y J.P. tienen valores de velocidad muy similares 7.70 m/s , mientras que L.M. es el atleta que difiere con una velocidad de 6.75 m/s . (Tabla 5.2.)

Los coeficientes de variabilidad en los parámetros evaluados en la penúltima zancada son menores al 10%, todos los atletas mantuvieron la consistencia en los parámetros de su zancada en los saltos analizados. (Tabla 5.3)

En el análisis del factor de rendimiento de centro de masa contra la pisada, se obtuvo que todos los atletas durante la carrera, la punta de su pie de apoyo en el antepenúltimo paso (APP) lo colocan en promedio 0.52 m enfrente de la cadera y en el penúltimo paso (PP) igualmente colocan la punta del pie de apoyo enfrente de la cadera con un promedio de 0.56 m. Todos los atletas colocan la punta del pie de apoyo más alejado de la cadera en el penúltimo paso (PP) a comparación del antepenúltimo paso (PP), con excepción a E.H. que el disminuye la distancia mínimamente en el penúltimo paso (PP) a comparación del antepenúltimo paso (APP). (Tabla 5.4)

A pesar de que se aumenta la distancia entre la cadera y la punta del pie de apoyo en el penúltimo paso las velocidades en la cadera de la fase de apoyo del penúltimo paso (Fase C) son mayores a las velocidades de la cadera en la fase de apoyo del antepenúltimo paso (Fase A).

En las gráficas de correlación de “ Δdx APP-Cad vs V_x Cad A” y “ Δdx PP-Cad vs V_x Cad C” (Figura 5.6), en la curva de regresión lineal se puede inferir en el grupo que mientras más velocidad lleve un atleta la distancia entre la cadera y la punta del pie de apoyo será mayor. Si nos ponemos a evaluar individualmente a cada atleta podemos apreciar que hay saltos en los que mientras más acortan la distancia tienen un valor de velocidad más alto, como es el atleta E.H. en el penúltimo paso tiene los valores más altos de velocidad mientras más cerca está la punta del pie de apoyo de la cadera.

El último factor de rendimiento de esta sección es el movimiento de los brazos y el análisis se centró en el brazo derecho, los ángulos articulares, velocidades horizontales y verticales. (Tablas 5.5 – 5.16 y Figuras 5.8 – 5.19)

En el gesto motor de los brazos cuando se tiene el primer contacto del pie de apoyo en el antepenúltimo paso (instante 1) el ángulo del brazo derecho (HomD-Cod-MuñD) se posiciona en un ángulo promedio de 108° , en la mayoría de los atletas en la fase de apoyo del antepenúltimo (Fase A) se comienza a flexionar el brazo como lo es para L.M., E.H. y J.P., los atletas A.A. y A.G. continúan con el braceo de la carrera abriendo el ángulo del brazo alrededor de 160° .

Cuando es el último contacto con el suelo del antepenúltimo paso (instante 2), los atletas J.P. y L.M. tienen un ángulo de flexión alrededor de los 80° , mientras que E.H. tiene una flexión más rápida llegando en este instante a un ángulo de 60° . Durante la fase de vuelo de la antepenúltima zancada (Fase B), los atletas A.G. y A.A. comienzan a flexionar su brazo, mientras que los demás atletas continúan con su movimiento de flexión que iniciaron en la fase anterior. Alrededor del instante 2 es cuando se tiene la mayor velocidad de flexión para el grupo.

En el instante que se tiene el primer contacto del penúltimo pie (instante 3), todos los atletas alcanzaron su ángulo de flexión más bajo alrededor de los 18° , la muñeca se encuentra

cercana a la altura del hombro. Durante el apoyo del penúltimo paso (Fase C) los atletas comienzan el movimiento de extensión del brazo para llegar a la postura de despegue. La fase C es cuando se tiene la mayor velocidad de extensión para todos los atletas.

Ultimo contacto del penúltimo paso (instante 4), en esta fase el promedio del ángulo del brazo del grupo es de 114° , el atleta con la menor extensión es E.H. con 91° , los atletas A.A., L.M. y J.P. tuvieron una extensión moderada alrededor de 115° y por último el atleta A.G. que tuvo una extensión más rápida en esta fase con 139° . Se continua con el movimiento de extensión durante la fase de vuelo de la última zancada-apoyo (Fase D).

Cuando la garrocha tiene su primer contacto con el cajetín (instante 5), los atletas tienen su brazo extendido un promedio de 153° . Los atletas A.A y L.M están por debajo del promedio cerca de 149° , E.H. y A.G se encuentran cerca de la media y el atleta J.P tiene la mayor extensión en el brazo con 158° . En los siguientes 0.08 s (Fase E), los atletas tienden a flexionar ligeramente el ángulo del brazo por el impacto del cajetín con la garrocha y para el final del gesto motor analizado (instante 6), los atletas extienden nuevamente el ángulo del brazo la mayoría recuperan el ángulo que tenían en el instante 5. El atleta E.H. lo vuelve a extender, pero ligeramente y el atleta J.P. extiende más de lo que extendió en el instante previo.

Sintetizando lo que se comentó anteriormente, los atletas comienzan la flexión en el apoyo del antepenúltimo paso A, se continúa flexionando en la fase B y en la fase C comienza la extensión del brazo para llegar a su máximo punto de extensión al final de la fase D.

En la velocidad horizontal todos los puntos articulares tienen un ligero aumento conforme avanza el tiempo, excepto en la fase C que es cuando este aumento es mayor.

En la velocidad vertical, el punto articular del hombro se mantiene cerca de una velocidad vertical nula, hasta que comienza la extensión del brazo en la fase C cambia a velocidad positiva y se mantiene así hasta el final. La muñeca desde que comienza la flexión mantiene un aumento de velocidad vertical constante hasta que comienza la extensión del brazo, que es cuando alcanza un pico y el valor máximo para esta articulación. Por último, el punto articular del codo en la fase de flexión obtiene velocidades verticales negativas ya que al flexionar el brazo descienden el codo ligeramente, el codo obtiene valores de velocidad vertical positivos cuando comienza el movimiento de extensión.

Despegue

El despegue de los atletas ocurre alrededor del instante 5, en la parte final de la fase D e inicio de la fase E.

El primer factor de rendimiento que se analizo es la postura del cuerpo, parámetros como ángulo de despegue, inclinación del tronco, altura de la muñeca, altura de la cadera, Angulo del Brazo, distancia entre cadera-muñeca y la distancia entre la cadera y cajón.

En el ángulo de despegue los atletas A.G., E.H., J.P. y A.A tienen un ángulo muy similar cercano a $33^\circ \pm 2$, el único atleta que difiere es L.M. que es un poco más alto de 37° . (Tabla 5.17)

La inclinación del tronco es un parámetro el cual varía más entre atletas, el atleta con el tronco más inclinado es el atleta L.M. con un ángulo de -21° , esto indica que el tronco se encuentra inclinado ligeramente hacia atrás. El atleta con la postura del tronco más erguida es el atleta J.P con una inclinación de -13° , a pesar de esto el tronco sigue ligeramente inclinado hacia atrás. (Tabla 5.17)

La altura de la muñeca en el instante que la garrocha tiene su primer contacto para la mayoría de los atletas está alrededor de la media de $2.11 \text{ m} \pm 0.04$, el atleta a L.M. es el único que sale de este estándar con un promedio de 2.29 m . En la altura de la cadera los atletas se quedan en el mismo rango dentro de la media de $1.02 \text{ m} \pm 0.05$. (Tabla 5.16)

El ángulo del brazo derecho de los atletas en el instante 5 no difieren mucho entre ellos, la media es de 153° , el atleta que tiene su brazo más extendido en este instante es J.P. (Tabla 5.17)

La diferencia de distancia entre la cadera y muñeca, indica si el atleta posiciona su muñeca enfrente o atrás de la cadera. Un valor negativo significa que la muñeca se posiciona detrás de la cadera. Los atletas J.P. y A.G. son los atletas que posicionan más cercano a su cadera en este instante promedio de 0.07 , mientras que los demás atletas posicionan su muñeca más atrás alrededor de 0.15 m . (Tabla 5.17)

El último parámetro que se evaluó para la postura del cuerpo en el instante 5 es la distancia entre el cajetín donde se planta la garrocha y la cadera, tiene una correlación muy grande con la longitud de la garrocha, si la garrocha es más larga este parámetro aumenta. El atleta con la distancia más corta es L.M. con un promedio de 3.14 m , seguidos de A.A. y E.H. con un promedio de 3.35 m , los atletas con la distancia más larga en este parámetro son J.P. y A.G. alrededor de 3.60 m . (Tabla 5.17)

Se calculó el coeficiente de variación para cada parámetro del factor de rendimiento de la postura en el instante 5, en la mayoría de los parámetros el coeficiente es menor al 10% por lo que los atletas tienen una buena consistencia en los parámetros evaluados. Sin embargo, los parámetros de inclinación del tronco y distancia entre cadera-muñeca tienen un coeficiente de variación por encima del 10% lo cual indica que los atletas varían moderadamente en este parámetro. (Tabla 5.18)

El último factor de rendimiento es la velocidad de la rodilla contraria a la pierna de despegue (péndulo). Se evaluó la velocidad horizontal y vertical en la fase D, en la fase E se calculó la velocidad y aceleración en el eje vertical como horizontal.

La velocidad horizontal en la fase D los atletas promediaron una velocidad de 10.71 m/s , el atleta más lento en esta fase es L.M. con un registro promedio de 10.45 m/s y el atleta más rápido es A.G. con una velocidad de 10.99 m/s . En la fase E que es la siguiente, la mayoría de los atletas aumentan moderadamente la velocidad horizontal, el promedio

registrado para el grupo es de 11.29 m/s. Sin embargo, los atletas A.A. y L.M. tienen una disminución en la velocidad horizontal mayor a 1.00 m/s. (Tabla 5.19)

Si analizamos la aceleración horizontal en la fase E de la rodilla de péndulo los atletas E.H. y A.G. tienen una pequeña aceleración por lo que indica que aumentaron muy poco la velocidad de la fase anterior, el atleta J.P. tiene una aceleración de 24 m/s^2 por lo que aumentó considerablemente su velocidad en esta fase. Los atletas A.A. y L.M. registraron aceleraciones negativas debido a que disminuyeron su velocidad horizontal en esta fase. (Tabla 5.19)

En la fase D, la velocidad vertical en esta fase no varía mucho entre los atletas y tiene una media para el grupo de 0.34 m/s^2 la rodilla de péndulo apenas va a comenzar a elevarse, atletas como L.M. y A.A. se acerca su velocidad horizontal cerca de 1 m/s se puede inferir que estos atletas comienzan un poco antes a elevar el péndulo. En la fase E, los atletas ya alcanzan velocidades altas con una media de 5.64 m/s. (Tabla 5.19)

A diferencia de la aceleración horizontal la aceleración vertical es positiva para todos los atletas y alta. El promedio es de 68.20 m/s^2 , el atleta con la mayor aceleración vertical es el atleta E.H. con un promedio de 76 m/s^2 y las aceleraciones más bajas son de los atletas L.M. y A.G. con 62.34 m/s^2 . (Tabla 5.19)

La gráfica de correlación de la velocidad vertical de la rodilla en la fase E ($V_y E$) contra la aceleración vertical de la rodilla en la fase E ($A_y E$) (Figura 5.23), se realizó con el objetivo de identificar que atletas tienen mayor explosividad en el péndulo, mientras más arriba y a la derecha se encuentre el punto en la gráfica, más explosivo es el movimiento. Se puede identificar fácilmente que el atleta E.H. es el atleta más explosivo en este movimiento.

Finalizando el análisis del péndulo, se graficó la correlación de la diferencia de velocidad horizontal entre la fase E y la fase D (ΔV_x) (Figura 5.23) contra la diferencia de vertical de la fase E y la fase D (ΔV_y). Se hizo esta correlación con el propósito de identificar si el atleta al tener un aumento en la velocidad vertical se compensaba con una pérdida en la velocidad horizontal. Se hizo una regresión lineal con los valores de los 18 salto y da una pendiente negativa por lo que puede inferirse que es correcto el enunciado anterior.

Correlaciones Variable de Rendimiento

La variable de rendimiento que se tomó para evaluar la transferencia de energía del atleta hacia la garrocha es la velocidad vertical con la que la garrocha se extiende desde el instante de su máxima flexión hasta que se extiende completamente ($V_y DG$). El promedio de este parámetro en el grupo es de 2.3 m/s^2 , el atleta con la mayor velocidad promedio es A.G. con 2.59 m/s^2 y el atleta más lento es L.M. con 2.06 m/s^2 . (Tabla 5.20)

Se tomaron 7 parámetros de posición en el instante 5 y 14 parámetros en la fase E y D para evaluar la correlación de la variable de rendimiento. Parámetros de posición en el instante 5: ángulo de despegue, inclinación del tronco, Δ cadera-muñeca, altura muñeca, altura cadera, ángulo brazo, Δ cajón-cadera. Parámetros de velocidad: V_x _RodD_D, V_x _RodD_E, A_x _RodD_E, V_y _RodD_D, V_y _RodD_E, A_y _RodD_E, V_x _MuñD_D,

$V_{x_MuñD_E}$, $V_{y_MuñD_D}$, $V_{y_MuñD_E}$, ω_{Brazo_D} , ω_{Brazo_E} . Parámetros de aceleración: $A_{x_MuñD_E}$, $A_{y_MuñD_E}$

Interpretando la matriz de correlación para nuestra variable de rendimiento de interés $V_{y_DesdobleGarrcocha}$. (Figura 5.26) Una correlación positiva significa que si una variable aumenta la otra disminuye, una correlación negativa significa que mientras una disminuye la otra variable aumenta. Si el valor es cercano a 0, significa que no presenta correlación.

Tomaremos como parámetros significantes las variables con una correlación cercana o mayor a 0.5. Las variables con correlación positiva: inclinación de tronco, $\Delta cadera-cajón$, $V_{x_RodD_D}$, $V_{x_RodD_E}$, $A_{x_RodD_E}$, ω_{Brazo_E} . Variables con correlación negativa: ángulo de despegue, $\Delta cadera-muñeca$, altura muñeca, $V_{x_Muñeca_E}$, $A_{x_Muñeca_E}$.

Inclinación del tronco, un el ángulo mayor (inclinación hacia enfrente), la variable de rendimiento aumentara. Es importante destacar que, en los saltos evaluados todos los atletas tienen un ángulo de inclinación negativo (tronco inclinado hacia atrás). Se obtiene mejor velocidad vertical en la garrocha si el ángulo del tronco se acerca a 0 (erguido), no se tienen saltos con el tronco inclinado hacia enfrente.

$\Delta Cajón-Cadera$, mientras mayor sea la distancia que hay entre el cajón donde se planta la garrocha y la cadera, se obtiene aumento en $V_{y_DesdobleGarrcocha}$. Este parámetro se encuentra altamente correlacionada con el parámetro anterior, ya que si la cadera se encuentra más enfrente (menor distancia en $\Delta Cajón-Cadera$) y como el agarre del atleta no se desplaza durante este movimiento, por ende, el tronco se inclina negativamente (hacia atrás). El atleta debe de buscar no adelantar su cadera para no inclinar su tronco hacia atrás.

$V_{x_RodD_D}$, a mayor velocidad horizontal en la Fase D aumenta también la variable de rendimiento, al igual que $V_{x_RodD_E}$ y $A_{x_RodD_E}$. La velocidad horizontal y la aceleración horizontal están correlacionados con nuestra variable de rendimiento. Sin embargo, la velocidad de la rodilla (péndulo) en la fase D tiene una correlación nula con la velocidad y aceleración de la rodilla (péndulo) en la fase E. Por lo que el atleta debe de llevar una alta velocidad en la fase D y aumentar esta velocidad en la Fase E.

ω_{Brazo_E} , mientras mayor velocidad angular mayor será la transferencia de energía, se debe tener cuidado al interpretar ya que no se refiere a que después del impacto el atleta debe de mantener la extensión de su brazo, como se puede observar en las gráficas de la cinemática del brazo los atletas durante la fase D después del impacto en el instante 5 se tiene una pequeña flexión y después una extensión. Este parámetro tiene una correlación positiva con los parámetros de inclinación del tronco y $\Delta cajón-cadera$, si la cadera esta más alejada del cajón, el tronco se encuentra menos inclinado hacia atrás, por consecuente se tiene una mayor estabilidad para recuperar la extensión del brazo. El atleta debe de recuperar el ángulo en la Fase E después del impacto de la garrocha contra el cajón en el instante 5.

Ángulo de Despegue, menor ángulo mayor velocidad en nuestra variable de rendimiento. Es importante mencionar que este factor depende de la longitud de la garrocha

y de donde coloque su agarre el atleta, mientras mas bajo sea el agarre mayor es el ángulo de despegue.

Δ Muñeca-Cadera, a menor distancia entre la muñeca y la cadera, la velocidad del desdoble de garrocha aumenta. Este parámetro de posición esta correlacionado con el ángulo de despegue, inclinación del tronco y Δ cajón-cadera. Si el atleta posiciona la muñeca por detrás de la cadera (mayor distancia Δ muñeca-cadera), el ángulo de despegue aumenta. Si posiciona la muñeca enfrente, la inclinación del tronco aumenta (inclinación hacia enfrente), por consecuencia el parámetro Δ cajón-cadera aumenta (más alejada).

Altura muñeca, a menos altura de la muñeca, se obtiene mejor velocidad en el desdobles de la garrocha. Parámetro altamente correlacionado con el ángulo de despegue como se mencionó anteriormente, si el atleta tiene un agarre más arriba de la garrocha el ángulo de despegue es mayor.

V_x _Muñeca_E y A_x _Muñeca_E, mientras menor es la velocidad y aceleración horizontal de la muñeca en la fase E mayor será la transferencia de energía. Esto se refiere a que el implemento genera mayor resistencia contra el atleta, una garrocha que no proporcione resistencia provoca que no disminuya la velocidad horizontal.

Sintetizando el análisis, para obtener el mejor resultado en nuestra la variable de rendimiento (V_y _DesdobleGarrocha) que es el aumento de velocidad vertical, se toman en cuenta diferentes factores. La postura que debe de adoptar el atleta cuando la garrocha tiene su primer contacto con el cajón (instante 5), debe de evitar inclinar el tronco hacia atrás, evitar adelantar la cadera, alinear verticalmente muñeca-cadera y buscar un ángulo de despegue no tan grande. La velocidad horizontal es el parámetro con mayor correlación por lo que el atleta debe de buscar llevar la máxima velocidad horizontal posible para esta fase. Por último, en el instante del impacto el atleta flexiona un poco el brazo y debe de recuperar el ángulo de inicio en el instante del impacto en la fase E realizando una extensión.

Trayectoria y Velocidad del Gesto Motor

En las gráficas de trayectoria (Figuras 5.27 – 5.29) podemos observar que los atletas tienen curvas similares, a pesar de eso se puede diferenciar que atleta inicia antes el movimiento de flexión y extensión del brazo.

El atleta que realiza más rápido la flexión del brazo es el atleta E.H. en el instante 2 ya se cruzaron las curvas de movimiento de la muñeca y el codo, mientras que el atleta que inicia más tarde el movimiento es el atleta A.A. el cual sus curvas de trayectoria para la muñeca y el codo se cruzan casi a la mitad de la fase B. Esta información se corrobora en las talas de velocidad angular, donde E.H. tiene la velocidad angular negativa mayor (flexión) y A.A. tiene la velocidad angular positiva mayor en la Fase A.

Cuando los atletas tienen su máximo ángulo de flexión es en el instante 3 como se menciona anteriormente, esto se puede apreciar en la gráfica. Este máximo es cuando la curva del hombro y de la muñeca se cruzan. El atleta E.H. como realizo el movimiento de flexión más rápido, alcanzo su punto máximo de flexión antes que los demás, sin embargo, aunque

el atleta A.A inicio su fase de flexión más tarde, el movimiento fue muy rápido y alcanzo su ángulo máximo de flexión antes del instante 3. El atleta J.P. fue el atleta que obtuvo su máximo ángulo de flexión después que todos, después del instante 3.

El momento en el que codo sobrepasa en altura el hombro es previo al instante 4 durante la fase C, el atleta que llega antes a que el codo sobrepase la altura del hombro es el atleta E.H. y el que llega más cerca al instante 4 es el atleta J.P.

Analizando las curvas de los miembros inferiores, todos muestran similitud a excepción en la fase de apoyo en el penúltimo paso (Fase C). Se muestra una pequeña variación en la curva, los atletas E.H. y J.P muestran un comportamiento suave, pero los demás atletas tienen una pequeña curva, esto es debido a que estos atletas el primer contacto lo realizan apoyando el talón, a diferencia de E.H. y J.P. que realizan el primer contacto con el metatarso.

Finalmente, para las gráficas de velocidad horizontal y vertical para las curvas los miembros superiores (Antebrazo y Brazo Superior). (Figuras 5.30 – 5.35) Los picos de velocidad máxima tanto horizontal como vertical, se alcanzan entre el instante 3 y 4 en la Fase C, la cual es el apoyo del penúltimo paso. La velocidad horizontal de ambos segmentos tiene una desaceleración después del instante 5 por el contacto de la garrocha con el cajetín. Otra característica importante para destacar es que la velocidad del antebrazo siempre es superior a la velocidad del brazo superior, exceptuando en la fase D en la velocidad horizontal, la velocidad horizontal del antebrazo en la fase D es ligeramente menor a la velocidad horizontal del brazo superior en esta misma fase.

En las curvas de velocidad horizontal para los miembros inferiores, la curva del muslo y la pierna inferior empiezan con una desaceleración en la fase B y C llegando a su valor mínimo de velocidad horizontal en la fase C, después de esta fase tienen un aumento de velocidad en las siguientes fases llegando a su pico de máxima velocidad en el instante 5 y posterior tiene una desaceleración en la fase E. Las curvas de la velocidad vertical para ambos segmentos tienen el mismo comportamiento, disminuye progresivamente en las primeras fases llegando a su mínimo valor en la fase B y a partir de ese momento la curva va en constante aumento hasta alcanzar su máximo en la última fase.

Limitaciones

Una de las limitaciones del estudio es el número de muestras que se lograron capturar de los atletas, debido a que el tiempo con la que se guardaban los videos después de ser capturados era más grande que el tiempo entre los intentos de los atletas. Esta limitación de pruebas limita el estudio en el análisis estadístico, al ser un grupo de muestras pequeño, no se puede concluir un modelo de regresión lineal en las pruebas de estadística.

El tamaño del área del salto de garrocha es una limitante, porque los colchones delanteros de la zona no permitieron capturar los datos del pie de despegue. Lo que provocó que no se pudiera analizar el ciclo completo de carrera en los últimos tres pasos y no se pudiera realizar el análisis de dinámica.

Por último, la mayor limitante fue que no se logró obtener datos para las articulaciones del lado izquierdo del atleta, debido a que los marcadores que se colocaron de ese lado no se logran apreciar desde el plano que se tomaron las muestras. Provocando que no se pudiera calcular el centro de masa del atleta, por lo que se decidió solo analizar los segmentos del lado derecho.

Investigaciones Futuras

Partiendo de los parámetros con mayor correlación se puede identificar que parámetros son de mayor interés, por lo que en un estudio futuro se puede descartar un análisis profundo en las variables con menor correlación. Es importante aumentar las muestras para poder realizar una regresión lineal estadística.

Implementar una segunda cámara que capture los marcadores del lado izquierdo para poder calcular el centro de masa completo del atleta con el método que se plantea anteriormente y realizar el estudio de dinámica para complementar el estudio. Esto podría brindar más información para la comprensión del gesto motor del salto con garrocha.

El trabajo presentado sirve como base, identificando parámetros importantes para un futuro estudio de biomecánica deportiva y es aplicable para diferentes deportes.

Capítulo 7 - Conclusiones

En base al análisis de biomecánico realizado de los últimos tres pasos hasta la fase inicial de la pierna de péndulo, se realizan las siguientes conclusiones.

Se identificaron once parámetros de relevancia del gesto motor analizado para maximizar la eficiencia de la transferencia de energía. Cinco parámetros de posición en el instante que la garrocha impacta con el cajetín inclinación del tronco, alineación vertical cadera muñeca, ángulo de despegue, diferencia de distancia de la cadera con respecto al cajón, altura de muñeca. Cuatro parámetros de velocidad, velocidad horizontal de la rodilla derecha previo al impacto de la garrocha contra el cajetín, velocidad horizontal de la rodilla y de la muñeca y la velocidad angular del brazo después del impacto de la garrocha contra el cajetín. Dos parámetros de aceleración, aceleración horizontal de la rodilla y la muñeca después el impacto de la garrocha contra el cajetín.

El estudio biomecánico que se realizó mediante fotogrametría secuencial para analizar los ángulos articulares y las velocidades segmentarias del brazo y la pierna del lado derecho permitió identificar los parámetros biomecánicos que optimizan la transferencia de energía en la garrocha.

El patrón del movimiento del brazo derecho y de la pierna derecha difieren muy poco entre atletas, por lo que se puede realizar un patrón bastante definido para el grupo de estudio con las gráficas de promedio.

A pesar de que se obtuvo un número reducido en muestras el estudio es valioso, ya que se realizó durante una competencia. En el cual los atletas competían por llevarse el título del Campeonato Nacional Universitario, por lo que dieron su mejor esfuerzo y los datos son de esfuerzos máximos de los atletas.

En futuras investigaciones se debe de considerar obtener más muestras para el análisis estadístico y colocar una cámara adicional en el mismo lugar, pero del otro lado del plano para poder visualizar los marcadores del lado izquierdo y complementar el estudio agregando la parte del análisis de la dinámica la cual no se pudo realizar en el trabajo porque no se podía calcular el centro de masa del atleta sin los datos de las articulaciones del lado izquierdo.

El análisis del factor de rendimiento del centro de masa contra pisada, se obtiene una regresión lineal que no es concluyente por el número pequeño de muestras, resultaría interesante investigar esta correlación con más muestras para poder concluir si mientras más alejado se encuentra la punta del pie de apoyo de la cadera se obtiene una mayor velocidad.

Bibliografía

1. C.P. Olmos. (2020, mayo 16). Evolución del Salto con Pértiga o Garrocha. FMAA. <https://www.fmaa.mx/post/evoluci%C3%B3n-del-salto-con-p%C3%A9rtiga-o-garrocha>
2. Pole vault. (s/f). Worldathletics.org. Recuperado el 30 de noviembre de 2025, de <https://worldathletics.org/disciplines/field-events/pole-vault>
3. Francis, S. M. (2012). Differences In Ground Reaction Forces Between Take-Offs that are Out, On, or Under in the Pole Vault. North Dakota State University of Agriculture and Applied Science.
4. McCormick, M. (2010, septiembre 1). Soaring to New Heights: The Evolution of Pole Vaulting and Pole Materials. Usc.edu. <https://illuminate.usc.edu/2702-2/#:~:text=Since%20the%20inception%20of%20competitive%20pole%20vaulting,fiber%20glass%2C%20the%20material%20of%20poles%20used%20today.>
5. Kalso, R. (2023). Pole vault. EBSCO. <https://www.ebsco.com/research-starters/sports-and-leisure/pole-vault>
6. World Athletics. (2024). Reglamento de Competición y Técnico.
7. Petrov, V. (2004). Pole vault - the state of the art. *New Studies in Athletics*, 23–32.
8. Pedro Pérez Soriano, Dr. Salvador Llana Belloch. (2015). Biomecánica Básica Aplicada la actividad y el deporte. <https://politecnico.metro.edu.co/wp-content/uploads/2021/10/Biomeca%CC%81nica-Ba%CC%81sica-aplicada-A-La-Actividad-Fi%CC%81sica-Y-Al-Deporte-1%C2%B0-Edicio%CC%81n-2015.pdf>
9. Luis Roberto Barone, Carlos Eduardo Rodríguez, Marta Lucía Ghiglioni, Claudio Daniel González, Susana Silvia Luna. (s/f). Anatomía y Fisiología del Cuerpo Humano. CULTURAL LIBRERA AMERICANA S. A.
10. Marieb, E. n. (2008). Anatomía y Fisiología Humana (9a ed.). Pearson.
11. Joseph Hamill, Kathleen M. Knutzen, Timothy R. Derrick. (2015). Biomechanical Basis of Human Movement. Wolters Kluwer Health. <https://somepomed.org/wp-content/uploads/2018/01/Joseph-Hamill-Biomechanical-Basis-of-Human-Movement.pdf>
12. Hay, J. G. (1967). Pole Vaulting: A Mechanical Analysis of Factors Influencing Pole-Bend. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 38(1), 34–40. <https://doi.org/10.1080/10671188.1967.10614800>
13. Charles J. Dillman, Richard C. Nelson. (1968). The mechanical energy transformations of pole vaulting with a fiberglass pole. *Journal of Biomechanics*, Volume 1, Issue 3, 175-183. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(68\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0021-9290(68)90002-X).
14. Barlow. (1973). Kinematic and kinetic factors involved in pole vaulting. Ph.D. thesis, University of Indiana.
15. Dapena, J. (1978). A Method to Determine the Angular Momentum of a Human Body About Three Orthogonal Axes Passing Through Its Center of Gravity. Pergamon Press.
16. Gros, H. J. (1981). Computerized Analysis of the Pole Vault Utilizing Biomechanics Cinematography and Direct Force Measurement. University of Alberta.

17. Julien Morlier, Mariano Cid. (1996). Three-Dimensional Analysis of the Angular Momentum of a Pole-Vaulter. *Journal of Biomechanics*, 1085–1090. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00160-3](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00160-3).
18. Falk Schade, Adamantios Arampatzis, Gert-Peter Brüggemann. (2000). Influence of different approaches for calculating the athlete's mechanical energy on energetic parameters in the pole vault. *Journal of Biomechanics*, 1263–1268. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00087-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00087-7).
19. Falk Schade, Adamantios Arampatzis, Gert-Peter Brüggemann. (2006). Reproducibility of energy parameters in the pole vault. *Journal of Biomechanics*, 1464-1471. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.03.027>.
20. Julien Morlier, Michel Mesnard. (2007). Influence of the moment exerted by the athlete on the pole in pole-vaulting performance. *Journal of Biomechanics*, 2261-2267. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.10.022>.
21. Frère J, Göpfert B, Slawinski J, Tourny-chollet C. (2012). Effect of the upper limbs muscles activity on the mechanical energy gain in pole vaulting. *J Electromyogr Kinesiol.* 207-14. doi: 10.1016/j.jelekin.2011.11.007.
22. Kageyuki, Takafumi; Matsubayashi, Takeo; Ohyama, Keigo Byun; and Kigoshi, Kiyonobu. (2018). Behavior of the Pole in Pole Vault. <https://commons.nmu.edu/isbs/vol36/iss1/123>
23. El Mrimar, Ouadie & Bendaou, Othmane & Samoudi, Bouselham & el Haddad, Zakaria. (2024). Energy conversion in pole vaulting using finite element analysis. *Russian Journal of Biomechanics.* 87-98. 10.15593/RJBiomech/2024.1.08.
24. Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons.
25. Cheli, A. E. (2012). *Introducción a la Fotogrametría y su evolución*. Hesperides. <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/libagr/index/assoc/HASHc51a.dir/doc.pdf>
26. Bartlett, R. (2007). *Introduction to SPORTS BIOMECHANICS* (Taylor & Francis Group, Ed.). http://www.profedf.ufpr.br/rodackibiomecnica_arquivos/Books/Introduction%20to%20Sports%20Biomechanics.pdf

Apéndice A

Zona de Salto

En esta sección se presentan los estándares de las características que debe de cumplir la zona de salto, que establece la Asociación Internacional de Federaciones de Atletismo por sus siglas en ingles IAFF en su reglamento.

Pasillo de Carrera (Carril)

La longitud establecida para el pasillo de carrera debe de tener mínimo 40 m. Una anchura de $1.22 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}$ y estará delimitado por líneas blancas de 50 mm de ancho. No debe de tener inclinación en ningún sentido, si tuviera por cuestiones de fuerza mayor, la inclinación máxima permitida es de 1:100 (1%).

Cajetín

El apoyo de la pértiga en el salto se efectuará desde un cajetín. Debe de cumplir con las siguientes características: bordes superiores redondeados o sin ángulos cortantes, y enterrado a nivel del carril. Las dimensiones del cajetín son: 1,00 m de largo medido a lo largo del fondo interior del cajetín y 0,60 m de anchura en la parte anterior, disminuyendo hasta 0,15 m de ancho en la parte inferior del contenedor. La longitud del cajetín a nivel del pasillo de toma de impulso y la profundidad del contenedor quedará determinada por el ángulo de 105° que forman la base y el contenedor. (Tolerancias en dimensiones y ángulos: $\pm 0,01 \text{ m}$ y $-0^\circ / +1^\circ$). La base o fondo del cajetín estará inclinada desde el nivel del pasillo de toma de impulso en su parte anterior hasta el punto donde se une al contenedor, que tendrá una altura y profundidad de 0,20 m medida verticalmente. El cajetín debería estar construido de tal forma que sus costados se inclinaran hacia fuera y terminaran en el contenedor, formando un ángulo de aproximadamente 120° con la base del cajetín.

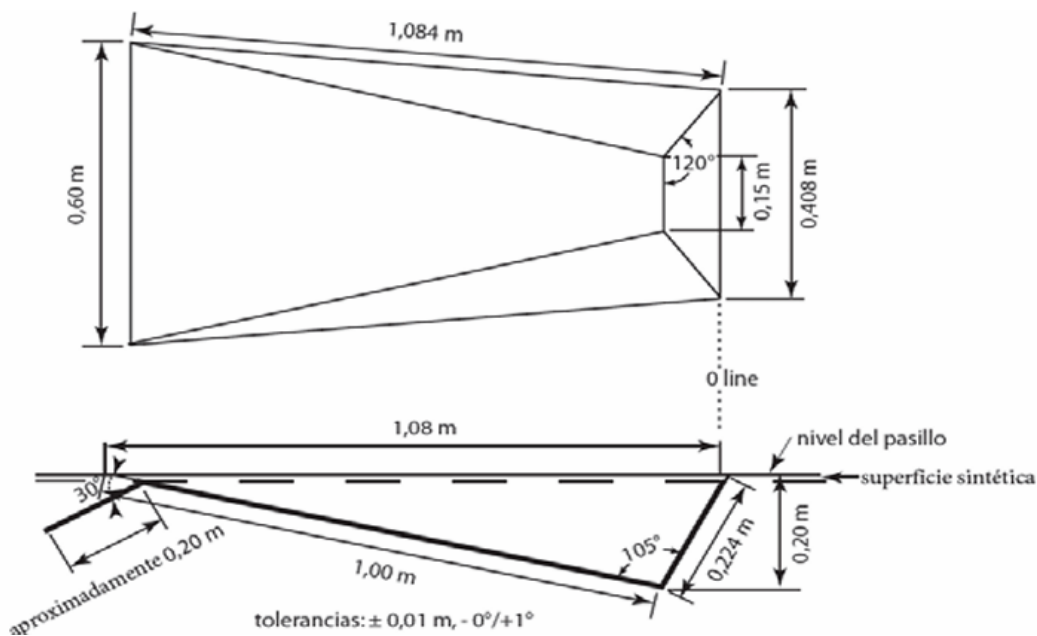


Figura A.1 - Cajetín de Salto con Pértiga (Vista cenital y lateral)

Saltómetros (Postes)

Puede utilizarse cualquier tipo de saltómetros o postes con tal de que sean rígidos. La estructura metálica de la base y de la parte inferior de los saltómetros encima de la colchoneta debe ser cubierta con relleno de material apropiado de forma que proporcione protección a los atletas y a las pértigas.

La varilla descansará en tacos horizontales de modo que, si es tocado por un atleta o por su pértiga, caiga fácilmente al suelo en el sentido de la zona de caída. Los tacos no presentarán muescas ni hendiduras de ninguna clase, serán de un grosor uniforme en toda su longitud y no medirán más de 13 mm de diámetro. No sobresaldrán más de 55 mm de los soportes, que serán lisos. El apoyo vertical posterior de los tacos, que también deberá ser liso y construido de modo que el listón no pueda descansar en su parte superior, se extenderá 35 mm-40 mm por encima de los tacos. La distancia entre los tacos será de 4,28 m-4,37 m. Los tacos deberían soportar el listón en el punto medio de los extremos. Los soportes del listón estarán a la misma altura sobre las superficies que soportan las bases de metal de los dos saltómetros.

Es importante mencionar que los postes deben de poder moverse libremente de 0 a 0.8 m ya que, la varilla puede ser colocada a cierta distancia cuando un atleta va a saltar, la línea cero es donde termina el cajetín y la varilla puede ser colocada a partir de esta línea hasta un máximo de 0.8 m.

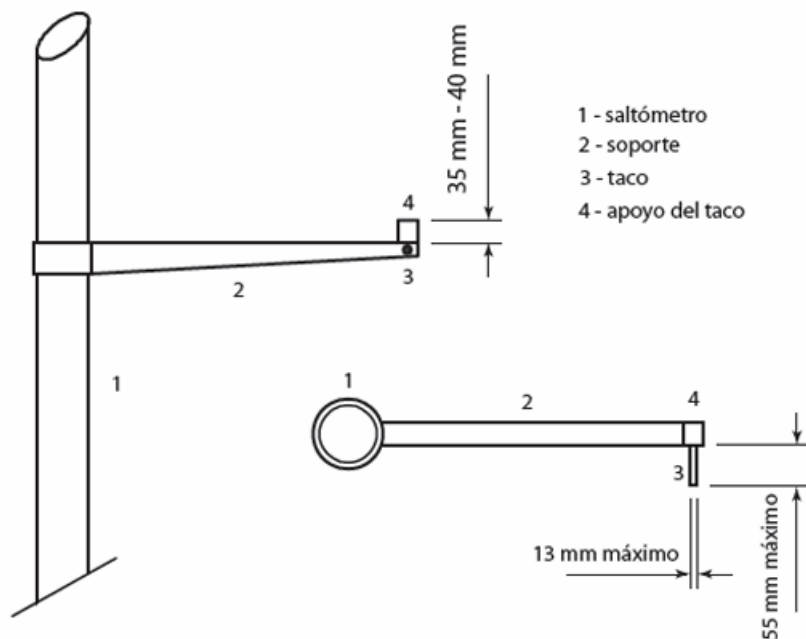


Figura A.2 - Soporte varilla de Salto con Pértiga (Vista desde la zona de caída y cenital)

Zona de Caída

La zona de caída no debe de ser menor a 6 m de largo por detrás de la línea cero x 6 m de ancho x 0.8 m de alto. Debe cumplir con las mismas características una zona de caída en la parte delantera de 2 m de largo por enfrente de la línea cero. Los lados acercándose al cajetín deben de estar separados por una distancia de 0.10 m a 0.15 m del cajetín y deben de inclinarse a un ángulo mínimo de 45° y máximo de 48°.

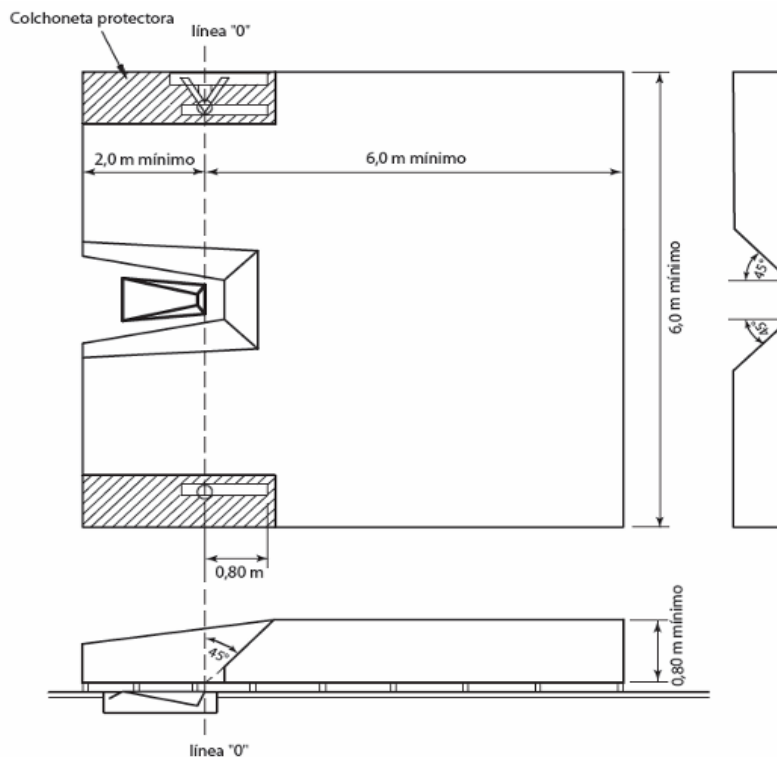


Figura A.3 - Zona de caída de Salto con Pértiga (Vista cenital y lateral)

Pértigas (Garrochas)

Las pértigas pueden ser de cualquier material o combinación de materiales, de cualquier longitud o diámetro, con la única condición de que la superficie básica sea lisa. Se puede utilizar cinta adhesiva en el extremo del agarre (para proteger la mano) y de cinta adhesiva u otro material apropiado en el extremo inferior (para proteger la pértiga). La cinta en el extremo del agarre debe ser uniforme exceptuando el forzoso solapamiento decapas y no debe provocar una modificación súbita del diámetro, tal como la creación de un "anillo" en la pértiga.

Cada atleta elige su garrocha dependiendo el peso, carrera y nivel de técnica que él tiene. En la actualidad los materiales más utilizados por los atletas es la fibra de vidrio y la fibra de carbono, la longitud varia desde los 2.35 metros que son la que utilizan los niños, hasta la 5.20 metros las cuales utilizan los saltadores de la elite. Una variable más, además de la longitud de la garrocha es el peso que esta puede estar sometida sin llegar a la ruptura, en el mercado actual hay desde 55 lb hasta 220 lb, este parámetro se decide dependiendo el peso del atleta y la velocidad con la que llega a despegar.