

**ESTUDIO HISTÓRICO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DURACIÓN DEL
SEGUNDO: FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y POTENCIAL
DIDÁCTICO**



**UNIVERSIDAD
PEDAGÓGICA
NACIONAL**

**AUTOR:
PEDRO CAMILO REYES CHURUGUACO
CÓDIGO: 2024184120**



**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
BOGOTÁ D.C. 2025**

**ESTUDIO HISTÓRICO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DURACIÓN DEL
SEGUNDO: FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y POTENCIAL
DIDÁCTICO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES**



**AUTOR:
PEDRO CAMILO REYES CHURUGUACO**

ASESORES:
José Francisco Malagón Sánchez
Sandra Sandoval Osorio
Yessica Viviana Barragán Orjuela

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
La enseñanza de las ciencias desde una perspectiva fenomenológica

GRUPO DE INVESTIGACIÓN
Estudios histórico-críticos y enseñanza de las ciencias - EHC[^]EC

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
BOGOTÁ D.C. 2025**

Contenido

Índice de Imágenes	6
Índice de tablas	8
Resumen	9
Introducción.....	12
Planteamiento del Problema.....	20
Pregunta Problema.	21
Objetivos.	22
Justificación.....	23
Metodología.....	24
Enfoque histórico–interpretativo.....	24
Análisis de fuentes primarias.	25
Análisis de fuentes secundarias.	26
Construcción conceptual.	28
Reflexión epistemológica.....	28
Capítulo 1. La noción de medición y sus implicaciones en la experimentación.	29
1.1. La medición como problema fenomenológico en la física.	29
1.2. Los instrumentos de medición en la práctica experimental: entre la teoría y el experimento.	33
1.3. La medición de la duración de un segundo como magnitud fundamental.	36
1.4. La historia de la medición de la duración en la cultura occidental.	39
Capítulo 2. La medición de la duración, los recursos experimentales y la ciencia moderna.	44
2.1. Galileo Galilei y el uso del péndulo para medir la duración de la caída de los cuerpos... 44	
2.2. Marín Mersenne y Johannes Baptista Riccioli: experiencias sobre la isocronía del péndulo.	46

Capítulo 3. El reloj de péndulo de Christiaan Huygens.....	49
3.1. El <i>Horologium Oscillatorium</i> publicado en 1673.....	50
3.2. Contexto histórico del siglo XVII: Holanda como epicentro de la ciencia y la técnica. ..	55
3.3. Componentes del reloj de péndulo	61
3.4. Funcionamiento del reloj de péndulo	66
3.5. Geometría del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide, evoluta, tautocronía e isocronía.	71
3.6. Matemática del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide y evoluta.....	84
 Capítulo 4. Diseño, impresión y construcción de reloj de péndulo como potencial didáctico...	85
4.1. Justificación de la construcción de un reloj de péndulo como estrategia investigativa. ...	85
4.2. Diseño conceptual y plan de trabajo.	87
4.3. Modelación 3D del mecanismo (software CAD).....	90
4.4. Diseño de componentes 3D.....	95
4.5. Fabricación e impresión 3D de componentes.	95
4.6. Ensamble de componentes.	97
4.7. Funcionamiento: tren de engrane, mecanismo de escape, peso y oscilación del péndulo.	100
4.8. Construcción paso a paso del reloj de péndulo.	104
4.9. Potencial didáctico del reloj de péndulo.	105
 Conclusiones.....	109
Condiciones técnicas y epistemológicas para el surgimiento del reloj de péndulo y la noción de segundo.....	109
Geometría, fenomenología y resolución ingeniosa de problemas físicos reales.....	109
La construcción contemporánea del reloj de péndulo como experiencia fenomenológica e histórica	110
Transformaciones en la práctica docente y en la percepción de la naturaleza	111
Potencial didáctico, científico y sociocultural del reloj de péndulo construido.....	112
 Referencias bibliográficas	113

Anexo No. 1. Matemática del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide y evoluta.	116
Anexo No. 2. Diseño de piezas para la construcción del reloj de péndulo.....	132
Anexo No. 3. Construcción paso a paso del reloj de péndulo	140

Índice de Imágenes

Imagen 1. Grabado francés de 1671 del reloj de péndulo de Huygens	9
Imagen 2. Clepsidra del año 1500 a.C.....	34
Imagen 3. Diseño de los componentes del reloj de péndulo..	38
Imagen 4. Rueda de escape tipo verja y volante foliot (balancín).....	40
Imagen 5. Huygens y la portada de la primera edición del " <i>Horologium Oscillatorium</i> " publicado en 1673.....	49
Imagen 6. Escape tipo verja y Escape tipo áncora.	52
Imagen 7. Curva cicloide y sus evolutas	54
Imagen 8. El reloj de Isaac Thuret.....	60
Imagen 9. Láminas “mejillas” cicloidales.	61
Imagen 10. La rueda de escape tipo verja	63
Imagen 11. Vista lateral izquierda del reloj de péndulo de Huygens y sus componentes...	64
Imagen 12. Aspecto del reloj de péndulo diseñado por Huygens..	66
Imagen 13. Dibujo de perfil lateral izquierdo de los componentes del reloj de péndulo.. ..	67
Imagen 14. Dibujo de las láminas “mejillas” cicloidales del reloj de péndulo de Huygens.. ..	68
Imagen 15. Representación de montaje experimental para analizar el isocronismo del péndulo.....	72
Imagen 16. Péndulo NO Isocrónico y Péndulo Isocrónico.	73
Imagen 17. Amplitudes de la oscilación con base en el concepto de isocronismo para el péndulo simple.....	73
Imagen 18. Duración experimental de cada oscilación frente al periodo teórico.....	76
Imagen 19. La curva cicloide..	77
Imagen 20. Curva cicloide generada por la rotación de 0 a 2π de una circunferencia sobre una línea recta..	77
Imagen 21. Relación geométrica entre la cicloide y su evoluta..	78
Imagen 22. Movimiento péndular limitado por las láminas “mejillas” cicloidales.....	78
Imagen 23. Diseño del péndulo isócrono de Huygens.	79
Imagen 24. Curva braquistócrona, que corresponde a una cicloide invertida.....	80
Imagen 25. Curva braquistócrona.....	81
Imagen 26. Agujas originales del reloj de Thuret preservadas por Jean-Claude Sabrier...	82

Imagen 27. Mecanismo de escape tipo ancora en la parte superior, y un piñón con dientes de sierra en la parte inferior.....	83
Imagen 28. Recursos e instrumentos para la construcción del reloj de péndulo.....	85
Imagen 29. Esquema 3D de reloj de péndulo para observar los diferentes componentes construidos.....	87
Imagen 30. Entorno virtual Autodesk Tinkercad.....	92
Imagen 31. Modelo tridimensional de un reloj de péndulo.....	94
Imagen 32. Estructura del reloj de péndulo.....	94
Imagen 33. Algunos de los componentes fabricados mediante impresión 3D.....	96
Imagen 34. Tres impresiones de la misma pieza.....	97
Imagen 35. Ensamble de piezas del reloj de péndulo, tren engrane principal.....	98
Imagen 36. Piezas elaboradas mediante impresión 3D.....	99
Imagen 37. Piñones originales del reloj de Thuret.....	100
Imagen 38. Tren de engrane principal.....	101
Imagen 39. Componentes del péndulo.....	102
Imagen 40. Reloj de péndulo construido.....	103
Imagen 41. Detalle de la polea que se conecta con el piñón minuterero.....	104

Índice de tablas

Tabla 1. Vista lateral del reloj de péndulo de Huygens con sus respectivos componentes (Ilustración I).	69
Tabla 2. Detalle de la suspensión cicloidal (Ilustración II).	70
Tabla 3. Vista frontal de la caja del reloj de péndulo. (Ilustración III).	70
Tabla 4. Resultados experimentales del movimiento pendular.	74
Tabla 5. Análisis comparativo con el valor teórico.	75

Resumen

“Reflexionar sobre cómo y por qué se mide es tan importante como realizar la medición en sí misma.”
(Reyes, 2025)

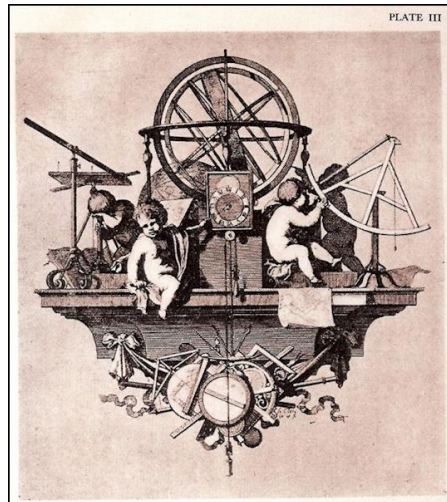


Imagen 1. Grabado francés de 1671 que muestra el reloj de péndulo de Huygens, el cual aparecería dos años después en *Horologium Oscillatorium*. Imagen tomada de “*Identificación y atribución del primer reloj de péndulo de Christiaan Huygens*”, en donde Jean-Claude Sabrier presenta la fotografía de una xilografía de Martín.

La medición del segundo como unidad de medida del tiempo, constituye uno de los aspectos más interesantes en la historia de la ciencia y en la consolidación de la física como disciplina experimental.

La presente propuesta muestra un estudio sobre la construcción de la duración del segundo – entre las que se destaca el reloj de péndulo diseñado por Christiaan Huygens en 1656 – que instituyó un modo de concebir la regularidad, la trazabilidad y la objetividad en la práctica científica. A través de un análisis histórico-interpretativo, se desarrolla un estudio de fuentes primarias de información: el *Horologium Oscillatorium*¹ y la correspondencia de Huygens, junto a estudios epistemológicos contemporáneos, con el objetivo de reconstruir la ruta mediante la cual el segundo pasó de ser una noción cultural, para convertirse en una magnitud física medible y reconocida universalmente.

Medir es un proceso complejo en el que la teoría, el conocimiento sobre el uso del

¹ En adelante nos referiremos al *Horologium Oscillatorium* publicada por Christiaan Huygens en 1673 como *HO*, salvo algunas ocasiones en que se considera amerita el uso del nombre completo.

instrumento de medición y la experticia convergen para modelar lo que comprendemos por “tiempo medido”, “paso del tiempo” o, “duración”. En este sentido, el reloj de péndulo se ha convertido en un aparato con las características pertinentes para reflexionar sobre cómo la objetividad científica surge a partir de necesidades técnicas, debates filosóficos y acuerdos socioculturales.

La construcción experimental de un reloj de péndulo, basada en la comprensión de las fuentes históricas primarias y secundarias, desarrollada con herramientas contemporáneas de modelación CAD (diseño asistido por computador) y fabricadas manualmente o mediante impresión 3D; se convierte en un recurso que permite un acercamiento a los métodos utilizados en el siglo XVII. Es importante dejar claro que no se trata de construir una réplica exacta del reloj de péndulo original sino de hacer un proceso intelectual en el que se comprende cómo se desarrollan mediciones de la duración de un segundo mediante las oscilaciones del péndulo. Esto requiere analizar los conceptos geométricos que acompañan este tipo particular de movimiento como: cicloide, evoluta, isocronía, tautocronía, braquistocronía, entre otros. También se favorece la reflexión crítica sobre los procesos de validación y los criterios de precisión vinculados a la historia de la medición de la duración del tiempo. En este contexto se identifica el reloj de péndulo como una “pieza” fundamental para la medición, particularmente en las prácticas experimentales, que vincula historia, teoría e instrumentación, lo que le confiere un posible potencial pedagógico y didáctico.

Desde esta articulación entre historia, teoría e instrumentación, se propone una estrategia para la comprensión de conceptos fundamentales de las ciencias naturales, que en algunos casos pasan desapercibidos, cuando la enseñanza se limita a la aplicación de fórmulas. Dicha estrategia tiene como fin aportar a la integración de lo experimental, la reconstrucción histórica y el análisis fenomenológico de aspectos importantes relacionados a la medición del tiempo. Además, la elaboración del diseño en 3D, la impresión y el ensamble de cada una de las piezas del reloj de péndulo construido otorga a esta propuesta un carácter original e interdisciplinario, con aportes significativos que permiten cuestionar y complejizar el rol del maestro, generando experiencias y reflexionando sobre ellas, con el objetivo de dinamizar el conocimiento científico mediante propuestas que aporten y nutran el estudio tanto en la historia y filosofía de la ciencia como en la didáctica para la enseñanza de la física.

Palabras clave

Péndulo, reloj de péndulo, cicloide, evoluta, isocronía, tautocronía, braquistocronía, medición, duración, tiempo, instrumento de medición.

Introducción

La física como ciencia que interpreta a la naturaleza crea imágenes y/o representaciones de la realidad hasta donde la evidencia empírica le permite; la esencia de la física como ciencia se ha constituido históricamente sobre la base del uso del razonamiento hipotético-deductivo, el tratamiento sistemático de la experiencia y el recurso para la experimentación (Blanché, 1966). La consolidación de una ciencia sistematizada como la física ha requerido de la posesión de instrumentos de medición precisos, e inversamente, la construcción y el desarrollo de instrumentos de medición precisos han requerido de una ciencia consolidada y en continua retroalimentación mediante la relación entre la teoría y la experimentación.

Robert Blanché en *Le méthode expérimentale et la philosophie de la physique*, publicado en 1966, en el que cita a Serge Moscovici cuando se refiere a que: “en ese principio del siglo XVII, la cuestión no era realizar una experiencia (un experimento), sino establecer las condiciones que lo hacían posible”. Y más aún, como el mismo Blanché lo menciona y complementa: “por ejemplo la determinación del péndulo que oscila exactamente en un segundo (una de las cuestiones de la época)”. Permite un acercamiento a las tensiones o crisis técnicas que los pioneros de la experimentación apreciaron para transformar las prácticas científicas, y además para presentar el sustento teórico con el que se desarrollaron estudios sobre esas “condiciones”, a las que se refiere Moscovici y que hicieron posible a la física acceder al nivel de ciencia.

Una de las condiciones específicas que permitieron esta transformación fue percibir la necesidad de interpretar los fenómenos mediante magnitudes abstractas con el uso adecuado de instrumentos, que permitieron comparar las relaciones de sucesión y coexistencia entre dos o varios fenómenos, y no limitarse solamente al estudio de un fenómeno en sus propias dimensiones; es decir, aunque la medición de la duración de los fenómenos se puede realizar mediante comparaciones con otros fenómenos, llegar a la capacidad de reflexión epistémica, de mediante el movimiento oscilatorio del péndulo dar cuenta de la duración de un fenómeno ajeno al del mismo movimiento del péndulo, fue un

punto de reflexión importante, ya que permitió concebir la oscilación del péndulo como un patrón de medida temporal en la modernidad, permitiendo transformaciones socioculturales y cambios de paradigmas científicos respecto a la medición de la duración de un segundo.

Entre las distintas magnitudes estudiadas por la ciencia, la duración ha suscitado especial atención, pues su medición hace inteligible los cambios en los procesos estableciendo relaciones entre posición y movimiento. No obstante, la duración no es directamente aprehensible: su comprensión exige instrumentos capaces de traducir la sucesión de fenómenos en intervalos regulares y comparables. Esta necesidad convierte la medición del tiempo en obstáculo que debe atenderse desde una perspectiva fenomenológica y técnica. En este marco, y siguiendo a Blanché, este documento se sustenta en la noción de *tiempo empírico*: el tiempo físico y medible que opera en la física experimental y en la cronometrología².

Es necesario distinguir entre dos conceptos, que se utilizan en el presente documento, a veces interpretados de forma ambigua: “tiempo” y “duración”³. Al remitirnos al “*tiempo*” (*tempus absolutum*) se desea expresar una dimensión, por ejemplo, la fecha, el momento, el valor numérico de la coordenada temporal en la que se presenta el fenómeno; y cuando nos remitimos a “*duración*” (*tempus relativum*) se desea expresar una magnitud, que se mide mediante unidades de medida como el segundo, o cualquier múltiplo o fracción de este, incluyendo décimas, centésimas, milésimas, entre otros. Aunque surgen varias preguntas

² Cabe señalar la pertinencia de diferenciar los niveles en los que se despliega el trabajo del académico francés Robert Blanché con relación al tiempo: 1) Tiempo empírico (Físico-Medible) el de la física clásica y la cronometrología (Blanché, 1966), 2) Tiempo vivido (fenomenológico) percepción del paso del tiempo interno, variable, cualitativo., 3) Tiempo lógico: (estructural) el orden de anterioridad y posterioridad como relaciones lógicas (Blanché, 1955).

³ En la tradición clásica consolidada por Newton, el tiempo se concibe como una entidad absoluta, homogénea y matemáticamente continua, que “fluye” por sí misma sin depender de los sucesos naturales. En el Escolio General, Newton distingue expresamente entre *tempus absolutum* y *tempus relativum*, planteando que el primero es una dimensión, uniforme y no perceptible directamente por los sentidos; el segundo corresponde a una magnitud perceptible mediante sus medidas sensibles y prácticas, como los relojes, que solo dan aproximaciones (Newton, 1687/engranes1999).

sobre en definitiva qué es un segundo: ¿el límite de precisión de la medida de la duración con un reloj?, ¿la resolución en la escala de medida de la duración con un reloj?, ¿una experiencia fenomenológica que da cuenta del límite perceptual respecto al cambio presentado en los fenómenos?, ¿una definición operacional a partir de relaciones matemáticas?, ninguna de estas cuestiones se agota en la definición técnica establecida por el BIMP (2019).

En este estudio se propone una síntesis interpretativa con respaldo en la noción del tiempo fundamentada en la propuesta epistemológica de Robert Blanché, para quien el tiempo científico debe distinguirse en tres niveles: el *tiempo empírico* (medible y propio de la física experimental) (Blanché, 1966), el *tiempo vivido* (cualitativo y subjetivo) y el *tiempo lógico* (orden y estructura) (Blanché, 1955). El presente estudio se ha desarrollado explícitamente en el nivel del *tiempo empírico*, pues es en este nivel en donde los instrumentos —como el péndulo o el reloj de péndulo— posibilitan la construcción de la duración como magnitud física. Esto implica que el “segundo” no se entiende como una entidad metafísica o un dato inmediato de la experiencia, sino como una convención metrológica históricamente configurada cuya objetividad depende de los patrones técnicos y matemáticos que hacen posible medirlo. Esta aclaración evita ambigüedades y permite articular de manera coherente el estudio histórico del péndulo, la reflexión fenomenológica sobre la medición y el potencial didáctico del aparato construido.

La pregunta: ¿por qué la medición de la duración de un segundo es fundamental en las prácticas experimentales?, conduce a reconocer que muchas de las leyes científicas dependen de la posibilidad de medir intervalos de tiempo con precisión. La cinemática⁴, por

⁴ La comprensión de los aspectos fundamentales de la cinemática es esencial para el desarrollo de competencias científicas, en la medida en que involucra la adquisición de habilidades conceptuales, prácticas y analíticas. Estas incluyen la capacidad para describir y predecir el movimiento, el uso de instrumentos de medición para identificar datos cuantitativos experimentales, y la interpretación de gráficas y ecuaciones relacionadas con el movimiento (Hodson, 1993). Así el enfoque integral en la comprensión de la cinemática permite no solo entender los principios físicos, sino también, analizar la fenomenología en la medición de la duración de eventos o fenómenos cambiando la manera de comprender la medición de la duración en contextos científicos. (Figueira-Silva, 2014).

ejemplo, se apoya en la definición de duración para desarrollar conceptualizaciones como velocidad y aceleración. Sin un referente de duración, estas magnitudes carecerían de sentido operacional. En este contexto, la historia de los relojes, en particular la del reloj de péndulo, se revela como la posibilidad para analizar un momento específico de la historia de la humanidad, en la que se ideó un instrumento de medición de la duración de un segundo con precisión sin precedentes para aquella época, y que se configuró como “pieza” indispensable del procedimiento en las prácticas experimentales científicas del siglo XVII. Además, estos relojes de péndulo fueron estándar de cronometraje preciso por casi 271 años hasta la invención de los relojes de cuarzo en 1927.

Desde el punto de vista historiográfico, la medición del tiempo pasó de los relojes solares y clepsidras⁵ de la antigüedad a los relojes mecánicos de la Edad Media y luego, al reloj de péndulo de Huygens en el siglo XVII. Cada uno de estos instrumentos representó un avance en la capacidad para estabilizar la noción de medición de la hora, el minuto y por supuesto el segundo, ofreciendo mayor regularidad y trazabilidad. El reloj de péndulo, en particular, permitió fraccionar la duración en intervalos proporcionados, transformando los métodos utilizados para desarrollar mediciones en áreas de estudio como la astronomía, la navegación marítima y las prácticas experimentales en física. Comprender este proceso histórico nos sitúa frente a la dimensión sociocultural de la medición científica.

La aplicación del movimiento oscilatorio del péndulo a los mecanismos de relojería no parte de un fenómeno dado, sino de una serie de interpretaciones experimentales que, en

⁵ La clepsidra, también conocida como reloj de agua, es uno de los instrumentos más antiguos utilizados para medir el tiempo mediante el flujo constante de agua. Consiste en un recipiente con una pequeña abertura en la base, por donde el agua fluye hacia otro contenedor o hacia el exterior, permitiendo medir intervalos temporales en función de la cantidad de líquido transferido. Su precisión depende de factores como el tamaño del orificio y la estabilidad del flujo, que puede variar con el nivel del agua en el recipiente principal. Fue ampliamente utilizada en la antigüedad, destacándose en las civilizaciones egipcia, griega y romana, tanto en actividades cotidianas como en ceremonias. *Alexandre Koyré* en *Estudios de historia del pensamiento científico* menciona que las mediciones que *Galileo Galilei* realizó de los eventos o fenómenos que estudió, fueron obtenidos gracias a la calibración (comparación) del movimiento oscilatorio con la medición de la clepsidra.

el siglo XVII, reconocieron la regularidad en un movimiento que debía refinarse técnica y geoméricamente. En este contexto, Galileo no “descubre” una isocronía inherente al péndulo, sino que interpreta una repetición similar aproximada en las oscilaciones que él mismo configura como recurso comparativo en sus experimentos. Mersenne y Riccioli amplían estas observaciones mediante procedimientos que estiman desviaciones y condiciones de regularidad, mostrando que la oscilación pendular adquiere sentido metrológico únicamente dentro de un arreglo experimental específico (Koyré, 1981). Huygens, por su parte, propone una solución técnico-geométrica —la incorporación de límites cicloidales y un mecanismo de escape— que permite estabilizar intervalos de duración en un contexto donde la precisión fue una exigencia científica y social emergente.

La medición de la duración aparte de ser un dato inmediato de la experiencia también es una construcción sociocultural resultante de acuerdos, prácticas científicas e instrumentos de medición. Unidades como el segundo se consolidaron progresivamente a partir de dispositivos artesanales y, más tarde, de tecnologías cada vez más precisas. El análisis fenomenológico del reloj de péndulo evidencia que la duración no constituye una magnitud absoluta, sino una convención en constante transformación, impulsada por avances técnicos y por necesidades de sincronización social. Este enfoque permite emprender un estudio histórico-interpretativo sobre la configuración de la duración como magnitud física, y sobre el papel que desempeñan los instrumentos de medición y las unidades de medida temporales en la constitución y validación de las prácticas científicas.

Asimismo, es necesario reflexionar sobre que, en el campo de la física, comprender la cinemática, sin problematizar la noción de duración conduce a una visión reducida y sesgada que tiene que ver con los principios de la física clásica en sí misma, en la que algunas veces las fórmulas se presentan como verdades estáticas desvinculadas de su génesis histórica, social y cultural⁶. Al presentar el reloj de péndulo como objeto de conocimiento,

⁶ La comprensión de la cinemática es fundamental para el desarrollo de competencias científicas, ya que implica la adquisición de habilidades conceptuales, prácticas y analíticas. Estas incluyen la capacidad para describir y predecir el movimiento, el uso de instrumentos de medición para identificar datos cuantitativos experimentales, y la interpretación de gráficos y ecuaciones

se genera una experiencia activa que vincula la abstracción matemática mediante el uso de la geometría con la materialidad del instrumento. De este modo, se evidencia que conceptos como isocronía y tautocronía son nociones arraigadas significativamente en prácticas experimentales desarrolladas desde la perspectiva de ciencia moderna.

Así, el propósito es explorar la importancia de la medición de la duración y buscar establecer cómo el devenir de los instrumentos de medición de la duración, especialmente el reloj de péndulo diseñado por Huygens refleja la manera como la ciencia construye y valida sus categorías. Además, se pretende ofrecer un marco de análisis en el que la construcción de un instrumento de medición como el reloj de péndulo, mediante modelación CAD e impresión 3D permita poner de presente su potencial didáctico para la comprensión de la medición de la duración de un segundo desde una perspectiva práctica y significativa en contextos educativos.

Es pertinente reiterar que la construcción de un reloj de péndulo constituye una experiencia que articula la lectura histórica con la elaboración del propio instrumento. Más que reproducir los dilemas enfrentados por los artesanos y experimentalistas del siglo XVII, el acercamiento a situaciones problema vinculadas a la construcción, plantea preguntas propias sobre las condiciones que hicieron posible medir la duración de un segundo. Este proceso favorece una comprensión más compleja de los principios que sustentan la regularidad y precisión del péndulo como logros históricamente alcanzados, fruto de esfuerzos continuos por interpretar los fenómenos.

El estudio fenomenológico de la medición de la duración desde el punto de vista experimental, en la ciencia moderna se vincula también con la posibilidad de reproducir los fenómenos. Sin la regularidad garantizada por el reloj de péndulo construido en 1656 y, más tarde, por otros tipos de relojes, la comparación de experimentos en distintos lugares habría sido difícil; es más, se hubiera tardado la solución, que, en el siglo XVII, se propuso al

relacionadas con el movimiento (*Hodson, 1993*). Así el enfoque integral en la comprensión de la cinemática permite no solo entender los principios físicos, sino también, analizar la fenomenología en la medición de la duración de eventos o fenómenos

problema planteado por los científicos de la época, de cómo determinar la longitud recorrida en el mar, de lo que no solo dependía la vida de los marineros, sino también la economía de las naciones. Esta solución permitió el avance de disciplinas experimentales como la mecánica, la astronomía, la navegación marítima, entre otras; y también transformó la vida social y cultural, sincronizando actividades humanas en torno a un tiempo regulado.

El presente documento se organiza en cuatro capítulos: en el *Capítulo 1. La noción de medición y sus implicaciones en la experimentación*, se hace énfasis en la relevancia histórica y social de cómo las comunidades han organizado los eventos o fenómenos desde la antigüedad, pasando por el uso de relojes de sol, clepsidras, relojes mecánicos, entre otros, hasta la consolidación del segundo como unidad de medida trazable en el siglo XVII. Esta ruta histórica muestra que la ciencia moderna se apoya en técnicas e instrumentos de medición refinados, usados durante siglos y utilizados por artesanos que transmitieron sus conocimientos de generación en generación. Así también muestra que medir implica una traducción de experiencias en cuyo caso particular se reconoce que el tiempo no es un dato natural sino una construcción conceptual mediada por instrumentos.

En el capítulo 2. Recursos experimentales y el paso de la física a ciencia, se reconoce a Galileo Galilei, Marin Mersenne y Johannes Baptista Riccioli como pioneros en el uso del movimiento oscilatorio del péndulo para la medición de la duración de fenómenos. Las prácticas experimentales sistematizadas representan la transformación de una física aún influenciada por la especulación filosófica hacia una disciplina que consolidó sus prácticas mediante la sistematización de las experiencias. Este capítulo muestra que la validación de la ciencia se apoya en la reproducción y comparación experimental mediante recursos materiales que dotan de objetividad a las experiencias. A partir de este análisis se examinan las condiciones técnicas y experimentales utilizadas por Galileo Galilei para medir la duración de la caída de los cuerpos mediante el uso de clepsidras, y luego, el uso de diferentes tipos de péndulos.

El Capítulo 3. El reloj de péndulo y el Horologium Oscillatorium aborda cómo Christiaan Huygens logró sintetizar el conocimiento acumulado sobre el movimiento

oscilatorio del péndulo para aplicarlo en un aparato técnico que cambió paradigmas en la vida social y científica europea del siglo XVII: el reloj de péndulo. Este capítulo muestra detalladamente las condiciones geométrico-matemáticas y técnico-artesanales para la aplicación del movimiento oscilatorio del péndulo en un mecanismo de relojería capaz de medir la duración de un segundo. Se muestra que el reloj de péndulo representa dos momentos específicos que se relacionan con la consolidación de la ciencia moderna: 1) como instrumento de medición de la duración de un segundo, desde su diseño, construcción y función de cada uno de sus componentes mecánicos, y 2) el uso del instrumento como “pieza” indispensable para procedimientos experimentales en escenarios científicos.

Además, se analiza la transformación de la noción de la medición de la duración de un segundo en la sociedad europea del siglo XVII, con base en la regularidad del movimiento oscilatorio entendido como un mecanismo construido y refinado por la comunidad científica. Este capítulo es una oportunidad única para conocer cómo la geometría de la cicloide, la matemática del oscilador isócrono y la mecánica de los engranes se integran en un solo objeto de estudio, ofreciendo un recurso interdisciplinario de gran complejidad.

Y en el *capítulo 4. Diseño, fabricación y montaje del reloj de péndulo como potencial didáctico*, se presenta la ruta de construcción de un reloj de péndulo como recurso para la comprensión de la medición de la duración de un segundo, buscando prolongar la tradición relojera experimental en un contexto contemporáneo, y manteniendo viva la memoria de la innovación científica del siglo XVII. Desde esta perspectiva se invita a reflexionar sobre la validez de los conceptos científicos en la operacionalización de instrumentos concretos como el reloj de péndulo y su relación con la construcción de la noción de segundo.

En este capítulo se destaca que la medición de la duración de un segundo constituye una parte importante de la formalización científica. Sin duda alguna, la ciencia sin instrumentos de medición de la duración confiables y precisos, no poseería capacidad experimental y su aspiración hacia la construcción de imágenes o representaciones de la naturaleza no serían confiables. Al integrar historia, teoría y experimentación se promueve una interpretación crítica y fenomenológica de la idea del tiempo empírico.

Planteamiento del Problema.

En la formación del profesor de física, la medición del tiempo suele asumirse como un procedimiento estable y evidente. Se enseñan fórmulas, se utilizan instrumentos y se comparan intervalos sin interrogar las condiciones conceptuales, experimentales e históricas que hicieron posible hablar de duración y, en particular, de un segundo medible. Esta forma de abordar la medición reduce la actividad experimental a una operación técnica y oculta su carácter reflexivo, histórico y construido. Como consecuencia, el profesor carece de marcos para pensar críticamente cómo se instituyen las magnitudes físicas y qué papel cumplen los instrumentos en su consolidación.

Frente a esta limitación, surge la necesidad de retornar a un episodio histórico que concentra interrogantes fundamentales sobre la regularidad, la precisión y la validación experimental: el movimiento oscilatorio del péndulo y su aplicación a la relojería del siglo XVII. Sin embargo, el propósito de este trabajo no es reproducir fielmente ese pasado, ni reconstruir de forma exacta las condiciones técnicas de Galileo o Huygens. La perspectiva adoptada es fenomenológica: se trata de aproximarse a este episodio histórico desde preguntas contemporáneas del profesor de física, explorando cómo ese fenómeno fue interpretado, problematizado y construido, y qué aspectos de esa construcción pueden hoy iluminar la comprensión de la duración.

En este trabajo, la perspectiva fenomenológica se orienta a comprender cómo un fenómeno adquiere forma dentro de una práctica experimental. Retomando el planteamiento de Moscovici (1967), el movimiento no aparece como un objeto previamente dado, sino como una configuración que surge de la interacción entre instrumento, acción y observación. Desde esta mirada, la duración se concibe como un fenómeno que se estabiliza a través de operaciones técnicas, regularidades detectadas y decisiones de modelación conceptual. Este enfoque permite abordar el episodio histórico del péndulo como un espacio para interrogar las condiciones que hicieron posible que la duración emergiera como magnitud medible, generando un puente entre las preguntas del profesor hoy y los procesos a través de los cuales la ciencia configuró este fenómeno.

Desde esta mirada, la historia se convierte en un espacio de interrogación y no de reproducción. Los textos, diagramas, tensiones técnicas y soluciones relojeras del siglo XVII no se leen para reproducir la práctica original, sino para abrir un campo de reflexión donde converjan la experiencia actual del profesor, la fenomenología de la medición y el análisis histórico-crítico de las fuentes. Esta perspectiva permite considerar el péndulo isócrona no como un fenómeno natural “dado”, sino como un fenómeno históricamente configurado, cuyos elementos geométricos, dinámicos y mecánicos pueden ser reconstruidos conceptualmente para comprender qué hace posible la medición del segundo.

En este horizonte, la construcción de un artefacto inspirado en la relojería histórica —un reloj de péndulo diseñado y fabricado con herramientas contemporáneas— opera como artefacto potencializador: un dispositivo que condensa preguntas permite explorar la interacción entre teoría e instrumento y habilita al profesor para comprender cómo se produce un fenómeno medible. El aparato no busca replicar un diseño original, sino generar un espacio donde la formalización matemática, la geometría de la cicloide, la regularidad del movimiento y la experiencia material de ajustar un mecanismo se integren con las preguntas que originan esta investigación.

De este modo, el problema central se sitúa en esclarecer qué elementos del movimiento oscilatorio del péndulo —entendidos desde esta perspectiva fenomenológica y desde un análisis histórico-crítico— son relevantes para construir un dispositivo que permita articular historia, teoría e instrumentación en torno a la medición de la duración.

Pregunta Problema.

En consecuencia, la presente propuesta se orienta con base en la siguiente pregunta:

¿Qué elementos de la comprensión del movimiento oscilatorio del péndulo y su aplicación en la relojería del siglo XVII aportan a la construcción de un aparato con potencial didáctico que articule los estudios de carácter histórico, teórico e instrumental sobre la medición de la duración de un segundo?

Objetivos.

Objetivo general.

Analizar los elementos históricos, teóricos e instrumentales asociados a la comprensión del movimiento oscilatorio del péndulo y a su aplicación en la relojería del siglo XVII, para fundamentar el diseño y construcción de un aparato con potencial didáctico que articule dichos elementos en torno a la medición de la duración del segundo.

Objetivos específicos.

- Analizar, desde una perspectiva histórico-interpretativa las condiciones técnicas que, en el siglo XVII posibilitaron la aplicación del movimiento oscilatorio isócrono del péndulo en los mecanismos de relojería para establecer la duración del segundo, acudiendo a los textos del científico Christiaan Huygens y los antecedentes formulados por Galileo.
- Construir una comprensión fenomenológica de la duración de un segundo, allegando los elementos derivados del estudio histórico para hacer converger las formalizaciones geométricas, matemáticas y experimentales en el diseño del aparato para la medición de un segundo.
- Diseñar, fabricar y ensamblar un modelo operativo de reloj de péndulo, empleando herramientas contemporáneas de modelado tridimensional e impresión 3D para explorar experimentalmente la interacción entre su diseño técnico y los principios físicos que aseguran la isocronía del movimiento oscilatorio.

Justificación.

La presente propuesta se justifica por la necesidad de comprender cómo la noción de tiempo, y particularmente la duración del segundo, se configuró históricamente como el resultado de una compleja articulación entre fenómenos físicos, formalizaciones geométricas e instrumentos técnicos. El estudio del reloj de péndulo del siglo XVII ofrece un caso privilegiado para analizar este proceso, pues en él convergen la emergencia del razonamiento hipotético-deductivo, la geometrización del movimiento y la consolidación de una cultura de la precisión basada en el ingenio y la experimentación. Desde esta perspectiva, el reloj de péndulo se aborda como un auténtico dispositivo que hizo posible estabilizar una experiencia temporal reproducible.

El análisis de los aportes de Christiaan Huygens y Galileo Galilei puso de manifiesto que la isocronía del péndulo es una construcción técnico-geométrica que se estabiliza únicamente cuando intervienen mecanismos de escape, ajustes empíricos y colaboraciones artesanales. Por tal razón, la construcción de un reloj de péndulo ayuda a establecer de manera controlada las contingencias técnicas que hicieron posible la transformación de una oscilación aproximada en un patrón operativo de medición de la duración.

La propuesta adquiere, además, un alto valor como potencial didáctico al ofrecer un puente entre definiciones contemporáneas altamente abstractas —como la definición actual del segundo, basada en la oscilación regular asociada con una línea espectral particular de los átomos de cesio-133— y las prácticas históricas concretas que otorgaron sentido físico y social a la medición de la duración. En este marco, el reloj de péndulo fabricado y ensamblado se constituye en un recurso con elevado potencial didáctico, capaz de articular la experiencia sensible con la medición de la duración como magnitud física.

Metodología

A continuación, se exponen algunas de las orientaciones metodológicas que se han contemplado en esta propuesta para el desarrollo del análisis histórico y de su respectiva influencia en la comprensión de la duración de un segundo.

Enfoque histórico–interpretativo.

Se adopta un enfoque histórico–interpretativo⁷, en el que el estudio sobre el reloj de péndulo se concibe como un proceso dinámico que articula acontecimientos científicos, cambios de paradigma en contextos socioculturales e innovaciones técnicas con base en la sistematización de la experiencia. El enfoque histórico–interpretativo ofrece la posibilidad de analizar los documentos, experimentos y resultados producidos en el siglo XVII — particularmente los relacionados al reloj de péndulo de Huygens— situándose en el entramado social e intelectual de la época. Así, el análisis trasciende la simple descripción técnica de los instrumentos, para abrir un escenario en donde se presentan interpretaciones sobre cómo los personajes de la ciencia moderna temprana construyeron consensos a partir de dispositivos materiales.

En esta propuesta, el enfoque histórico–interpretativo se fundamenta en la tradición desarrollada por Alexandre Koyré, para quien la historia de la ciencia no consiste en relatar una sucesión cronológica de inventos, sino en comprender cómo se transforman los modos de pensar y de experimentar que hacen posible la constitución de objetos de conocimiento científicos. Desde esta perspectiva, el reloj de péndulo se analiza como un *objeto conceptual y experimental* en el que convergen problemas matemáticos, construcciones geométricas,

⁷ Considero que el enfoque histórico-interpretativo constituye una de las vías más fecundas para el estudio de la historia de los instrumentos científicos, particularmente el péndulo y el reloj de péndulo del siglo XVII, porque permite comprender no solo cómo se desarrollaron técnicamente, sino qué significaron y significan para las comunidades científicas y cómo transformaron sus formas de concebir el tiempo y su medición. Esta postura está sólidamente respaldada por la tradición hermenéutica de Dilthey, Gadamer y Ricoeur, así como por la historia conceptual de la ciencia desarrollada en el siglo XX.

recursos artesanales y nuevas formas de validar la experiencia. Seguir este enfoque implica reconocer que conceptos como duración, isocronía o segundo no preexisten a su formulación, sino que se construyen históricamente mediante prácticas, instrumentos y formalizaciones que los evidencian. De este modo, el análisis documental deja de ser meramente descriptivo y se convierte en una vía para examinar la génesis epistemológica de las magnitudes físicas que intervienen en la medición de la duración.

En el ámbito didáctico, este enfoque resalta que enseñar ciencias implica reconstruir las condiciones que hacen posible la aparición del fenómeno. La construcción del reloj de péndulo se convierte en un recurso que permite al profesor comprender que la objetividad de una magnitud —como el segundo— surge de prácticas experimentales, decisiones técnicas y procesos de formalización. En esta línea, Malagón, Sandoval y Ayala (2013) señalan que la actividad experimental consiste en la construcción de fenomenologías que abren modos de aparición del fenómeno y posibilitan su formalización en el marco de la enseñanza de las ciencias. Así, el trabajo experimental no se reduce a aplicar teoría, sino que constituye un espacio en el que los fenómenos se configuran como objetos de conocimiento a través de la interacción entre instrumento, acción y conceptualización.

Análisis de fuentes primarias.

El enfoque histórico-interpretativo adoptado implica el análisis de fuentes primarias, entre las que se destaca el *Horologium Oscillatorium* de Christiaan Huygens publicado en 1673⁸, su correspondencia con otros científicos como Ismael Boulliau, Samuel Karl

⁸ Durante su estancia como director de la Academia de Ciencias de París publicó esta obra clásica en donde ofrece una descripción matemática y geométrica completa sobre el movimiento oscilatorio del péndulo y además una descripción y diseño del reloj de péndulo construido en 1656.

“Kechelius” Kechel, Claude Mylon, Frans van Schooten⁹, John Wallis¹⁰, entre otros¹¹. Estas fuentes nos pone en relación con las elaboraciones que se dan en el siglo XVII, para comprender el proceso de transformación de la noción de medición de la duración de un segundo.

El análisis pone de precedente un tema de estudio específico que es de interés personal conocer y comprender: los debates, disputas y acuerdos que dentro de la comunidad científica se han presentado a causa del estudio de la medición de la duración de un segundo, mediante el reloj de péndulo.

Análisis de fuentes secundarias.

Complementariamente, se ha llevado a cabo un estudio de fuentes secundarias, que incluye estudios históricos, epistemológicos y filosóficos contemporáneos sobre la medición de la duración, el reloj de péndulo y el desarrollo de la ciencia moderna, especialmente con base en estudios históricos realizados por el académico francés Robert Blanché quien influye profundamente en la estructura intelectual de la presente propuesta desde su contribución con el concepto de duración (tiempo empírico), y de manera indirecta, al problema de la medición del tiempo; y por otros autores como Hans van den Ende, Víctor Kersing, Alexandre Koyré, Oliver Laesser, Ben Jordijk, Serge Moscovici, entre otros. Estos trabajos han proporcionado marcos interpretativos que enriquecen la lectura de las fuentes primarias, facilitando la identificación de continuidades, rupturas y resignificaciones a lo largo de la historia de la medición de la duración de un segundo. La revisión de esta literatura ha

⁹ Huygens estudio derecho y matemáticas en la universidad de Leiden entre 1645 y 1647, bajo la guía, entre otros, del matemático *Frans Van Schooten*, con quien mantenía correspondencia regularmente.

¹⁰ En el periodo previo a la publicación del libro *Arithmetica Infinitorum* de Wallis en 1656, Huygens y Wallis mantuvieron correspondencia extensa entre junio de 1655 y septiembre de 1656. Wallis fue el único inglés con el que Huygens tuvo correspondencia.

¹¹ De la correspondencia entre Huygens y Frans van Schooten, Mylon y Huygens, Huygens y Kechelius, Huygens y Boulliau, se deduce que hasta el 31 de mayo de 1657 el único tema discutido era el reloj de péndulo accionado por peso.

permitido, además, situar el aporte de la presente propuesta en el contexto de debates recientes en torno a la metrología y la historia y filosofía de la ciencia. El análisis cruzado de fuentes primarias y secundarias ha permitido una comprensión comparativa del objeto de estudio percibido desde diferentes puntos de vista.

Alcance histórico.

El estudio desarrollado en la presente propuesta aborda dos momentos clave en la historia de la ciencia: el primero, particularmente con el estudio sobre el reloj de péndulo de Christiaan Huygens diseñado y construido en 1656, y el segundo, la publicación de su obra *Horologium Oscillatorium* en 1673, que de ahora en adelante simplificaremos con las siglas *HO*; sin dejar de lado las contribuciones previas sistematizadas por Galileo Galilei, Marin Mersenne y Johannes Baptista Riccioli. Esta propuesta pretende mostrar cómo, a través de estos actores y sus experiencias (experimentos), se configuró una noción técnica de la medición de la duración de un segundo, como elemento indispensable para el avance de la ciencia moderna.

Se enfatiza en los años 1656 y 1673, ya que estos años constituyen el núcleo en el que se desarrollaron las principales transformaciones en torno a la consolidación de la aplicación de la oscilación del péndulo a un reloj con capacidad para medir la duración de un segundo y con la precisión requerida para la época. Específicamente la presente propuesta se limita a analizar el sustento teórico y geométrico desarrollado por Huygens respecto a instrumentos de medición de la duración — en particular el péndulo y el reloj de péndulo —, sin abordar de manera exhaustiva otros dispositivos anteriores o posteriores como clepsidras, relojes de cuarzo o relojes atómicos u ópticos, salvo como referencias para contextualizar el devenir de la medición de la duración del segundo. Esta delimitación garantiza que, desde la perspectiva de un enfoque histórico-interpretativo se eviten dispersiones que dificultan el análisis.

Construcción conceptual.

Otro componente presente en la metodología es la construcción conceptual. A partir del diálogo entre las fuentes primarias y los marcos teóricos contemporáneos, se ha desarrollado un análisis conceptual organizando ideas clave como isocronía, tautocronía, cicloide, evoluta, braquistocronía, entre otras. Este proceso ha permitido mostrar cómo dichos conceptos se han construido y desarrollado a lo largo de la historia y cómo se aplican en la práctica experimental científica. De este modo, la comprensión conceptual articula el análisis histórico con la construcción de recursos con potencial didáctico, de modo que los conceptos emergen de la interacción entre teoría, instrumento y experimentación.

Reflexión epistemológica.

La propuesta desarrollada se complementa con una reflexión epistemológica orientada a problematizar la naturaleza del conocimiento científico y la función de los instrumentos de medición, particularmente el reloj de péndulo, en la construcción de métodos y acciones de medición en la práctica experimental. La medición de la duración, al depender de convenciones técnicas e históricas, se convierte en una provocación para comprender cómo la ciencia no accede a la realidad de manera inmediata, sino a través de mediaciones socioculturales y técnicas. Esta reflexión permite aportar a la discusión, desde una perspectiva histórico-interpretativa, sobre la importancia de los relojes de péndulo en la consolidación de la ciencia moderna y su relevancia en la actualidad. El estudio y análisis de la fenomenología del reloj de péndulo, se integra como una dimensión transversal que conecta la reconstrucción histórica con recursos didácticos, ofreciendo herramientas innovadoras para comprender la ciencia como un asunto humano, en constante proceso de construcción.

Capítulo 1. La noción de medición y sus implicaciones en la experimentación.

*El objetivo de la ciencia es crear imágenes de la realidad hasta donde la evidencia empírica permita llegar.
(Cuellar, 2022)*

1.1. La medición como problema fenomenológico en la física.

La medición en física no debe ser comprendida como una operación mecánica en la que se asignan números y unidades de medida a magnitudes, sino como un ejercicio lleno de significado desde el punto de vista fenomenológico. Desde la perspectiva de Robert Blanché (1966), el método experimental moderno surge específicamente cuando se conjuga la experimentación con la sistematización de las experiencias. Esto implica reconocer que medir es construir un dato significativo sólo en el marco de un modelo teórico. En este sentido, la medición es un acto interpretativo: la lectura de un cronómetro o la cantidad de agua en una clepsidra se convierten en formas de medir la duración únicamente porque existen esquemas conceptuales que traducen esas marcas, representaciones o imágenes en duraciones.

El carácter fenomenológico de la medición también se refleja en la tensión entre lo empírico y lo teórico. Santiago Cuéllar¹² (2022) en su publicación sobre epistemología de la medición, lo plantea en términos de validez y fiabilidad: medir implica siempre decidir qué es relevante medir, en qué condiciones y con qué márgenes de error. Esta tensión es evidente en la historia de la medición de la duración: Galileo, al usar la clepsidra, (Koyré, 1966), no estaba midiendo un “flujo” temporal, en realidad estaba cuantificando la regularidad de un fenómeno — el vertido del agua — que él mismo adoptó como patrón de medida de la

¹² La referencia corresponde a la ponencia del *Dr. Santiago Cuellar Rodríguez* presentada el 17 de febrero de 2022 en la mesa redonda “*Medición y Ciencia. Aspectos epistémicos y repercusiones metodológicas y regulatorias en investigación clínica*” dentro del ciclo “*Epistemología, metodología y regulación de la medición científica en el ámbito clínico*”, celebrado en la real academia nacional de farmacia.

duración para sus prácticas experimentales. El dato experimental, por tanto, no es independiente de la teoría, sino que emerge de ella y, a la vez, la alimenta.

La distinción entre tiempo y duración, enfatizada por Juan Tomé (2019) en su publicación: “*El segundo en el sistema internacional de unidades y la conveniencia de distinguir entre tiempo y duración*”¹³, se convierte en un ejemplo de cómo la medición se problematiza, mientras el tiempo puede concebirse como categoría abstracta, la duración es lo que realmente se mide, pues todo instrumento de medición de la duración registra intervalos y no instantes. Sin embargo, en los procesos para la comprensión de los conceptos en física, esta diferencia suele diluirse, lo que lleva a concepciones tales como la idea de que un reloj “mide el tiempo”; en realidad, cuenta la repetición de procesos periódicos que son tomados como patrones de medida de la duración. Esta aclaración conceptual es fundamental para una comprensión crítica de conceptos fundamentales en cinemática.

En esta propuesta se adopta la distinción conceptual según la cual *tiempo* es una categoría formal que permite ordenar los fenómenos, mientras que *duración* es la magnitud física que se hace operativa mediante instrumentos. En coherencia con esto, el *segundo* se convierte en una unidad de medida de la duración, históricamente configurada cuyo estatus depende de la existencia de un dispositivo capaz de reproducir y repetir un movimiento patrón en intervalos temporales equivalentes.

Desde el punto de vista histórico, la medición de la duración muestra cómo la ciencia construye sus magnitudes a través de instrumentos diseñados para producir regularidad. Según Koyré (1981), desde la clepsidra utilizada por Galileo hasta el reloj de péndulo desarrollado por Huygens y construido por Salomon Coster, se pasó de un patrón fluido a un patrón oscilatorio. Esta transformación no expresa una regularidad natural del péndulo; introduce una forma distinta de generar intervalos estables mediante intervenciones técnicas y conceptuales que redefinieron la manera de comprender la duración. La precisión

¹³ Juan tomé menciona la importancia del segundo en el sistema internacional de unidades y la conveniencia de distinguir entre tiempo y duración. Juan Tomé es catedrático de Física y Química en el Ministerio de Educación Español, y profesor de la Universidad Complutense de Madrid.

alcanzada en el reloj de péndulo dependió de ajustar el movimiento oscilatorio a condiciones geométricas y mecánicas específicas, como el tipo de escape, la longitud del péndulo o la incorporación de láminas “mejillas” cicloidales propuestas por Huygens para aproximar el movimiento a un comportamiento isócrono. De este modo, la historia de estos desarrollos revela que medir implica diseñar, modificar y refinar instrumentos que materializan hipótesis teóricas sobre cómo estabilizar intervalos de duración.

Este enfoque histórico–interpretativo se articula con una perspectiva fenomenológica en la que el interés se centra en comprender cómo un fenómeno se constituye para un sujeto que lo interroga. En este caso, el fenómeno que se constituye, por parte de quien lo experimenta, es la medición de la duración de un segundo como magnitud medible a partir de un instrumento. De acuerdo con esta postura se interpretan las fuentes históricas como configuraciones que abren un horizonte de comprensión para el docente de ciencias naturales, en consonancia con la idea de que todo conocimiento se estructura en la interacción entre teoría, instrumento y experimentación, desde la perspectiva fenomenológica implícita en la actividad experimental.

La transformación en la noción de la comprensión de la duración asociada al reloj de péndulo se entiende como un cambio de paradigma en el que la regularidad de la oscilación del péndulo garantizó la objetividad de la duración de un segundo. Así, medir es un proceso de diseñar y refinar instrumentos de medición que representan las hipótesis teóricas, pues cada modificación técnica (tipo de escape, longitud del péndulo, láminas “mejillas” cicloidales, etc.) responde a la pregunta conceptual sobre cómo asegurar la isocronía del péndulo.

Uno de los aspectos que juega un papel importante en la fenomenología de la medición de la duración con relojes de péndulo, es el problema de la calibración de la oscilación. La metrología contemporánea reconoce que todo dato incluye incertidumbre, pero este principio también estaba presente implícitamente en los experimentos de Mersenne y Riccioli, quienes reconocieron durante las décadas de 1630 y 1640 la dependencia del periodo del péndulo respecto a su amplitud. Su esfuerzo por sistematizar las desviaciones y

compararlas con la teoría anticipó la noción moderna de error experimental. Por ello, comprender la medición en las prácticas experimentales problematiza la naturaleza de la incertidumbre y su papel en la construcción de conocimiento fiable.

Otro aspecto importante es el papel que cumplen los patrones de medición reconocidos socioculturalmente. El segundo, definido primero a partir del día solar medio, luego por relojes de péndulo y, recientemente por oscilaciones atómicas, muestra que medir es también establecer acuerdos. La medición trasciende la experimentación en el laboratorio y se inscribe en redes sociales e institucionales que legitiman su trazabilidad. En este sentido, comprender el ejercicio de medir en la práctica experimental involucra la discusión de cómo se han construido los sistemas de unidades de medida y por qué, más allá de la utilidad técnica.

La reflexión sobre la medición de la duración de un segundo también se enriquece con la geometría y la matemática relacionada al reloj de péndulo. Por ejemplo, la construcción de la curva cicloide por Huygens como solución al problema de la no isocronía del péndulo ha mostrado que medir no depende solo de la manipulación del instrumento, sino también de la experticia y la capacidad para interpretar, y modelar geoméricamente ese movimiento y su trayectoria. La curva cicloidal, al convertirse en guía del péndulo, ejemplifica cómo la abstracción geométrica se materializa en un aparato que garantizó precisión a mediados del siglo XVII, revelando así, la estrecha unión entre técnica e ingenio.

Comprender la medición de la duración de un segundo es un acto de reflexión en torno a por qué se mide, con qué confiabilidad y en qué condiciones, más allá de ubicar una cifra en un instrumento de medición, o de dar cuenta de un número que se indica mediante algún tipo de medidor. Esto abre un escenario para la alfabetización científica en cuanto a que se construye la objetividad a través de instrumentos de medición, sin limitarse a la memorización de fórmulas. La medición de la duración de un segundo implica reconocer que los instrumentos de medición son objetos de conocimiento mediadores entre la teoría y la experimentación. El reloj de péndulo de Huygens fue un instrumento que consolidó una conceptualización de la noción de medición de la duración de un segundo como unidad de

medida regular, cuantificable y fraccionada. Al estudiar el reloj de péndulo, se entiende que cada innovación técnica (como la incorporación de las láminas “mejillas” cicloidales) aumentó la precisión y redefinió lo que significaba medir la duración de un segundo.

1.2. Los instrumentos de medición en la práctica experimental: entre la teoría y el experimento.

Galileo ofrece un ejemplo, al correlacionar la cantidad de agua vertida en su clepsidra¹⁴ (Imagen No. 2) con las distancias recorridas por cuerpos esféricos en planos inclinados; no se limitó a acumular resultados, también interpretó estos bajo la hipótesis de que la caída seguía una ley matemática regular. El dato empírico (agua recogida) solo se volvió evidencia científica porque se encuadra en un modelo teórico. Este caso muestra cómo lo empírico y lo teórico son procesos inseparables en el acto de medir.

¹⁴ El reloj de agua, conocido también con el nombre de *clepsidra* (del griego *kleptein* = robar, y *hydor* = agua, es decir, “ladrona de agua”), fue uno de los primeros dispositivos empleados por diversas civilizaciones para medir el paso del tiempo. Entre los pueblos que lo utilizaron desde la antigüedad se encuentran caldeos, egipcios y chinos, quienes diseñaron recipientes en los que el agua se escurría de manera continua, ya fuera gota a gota o en un flujo regular. La altura del nivel del agua en el recipiente permitía marcar la hora del día a través de indicadores laterales. En Grecia, el filósofo *Platón* introdujo este instrumento con fines prácticos y también pedagógicos, mientras que en Roma su uso se documenta en el año 157 a. C., gracias a la introducción realizada por *Publio Cornelio Escipión Nasica*. Incluso *Julio César* halló ejemplares de clepsidras en sus campañas militares en Inglaterra. No obstante, pronto se advirtió una limitación fundamental: el descenso del agua no guardaba proporcionalidad constante con el paso del tiempo, ya que el flujo se hacía más lento conforme bajaba el nivel del líquido, lo cual comprometía la precisión de la medida.



Imagen 2. Clepsidra que data del año 1500 a.C., se encontró en Egipto y es considerada la Clepsidra más antigua hasta el momento (izquierda). El agua fluye de una clepsidra con orificio en una altura mayor hacia la clepsidra sin orificio en una altura menor, mide el tiempo mediante el flujo gradual de un líquido entre dos recipientes graduados. (derecha). Imagen tomada de Whitrow, G., (1988).

Así describe el mismo Galileo (1638) la medición de la duración mediante una clepsidra:

En lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a una buena altura y que, a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiendo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso pequeño durante todo el tiempo en que la bola descendía, bien por todo el canal o solo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y las proporciones de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de manera sensible. (Galileo, 1638).

En la etapa inicial de la modernidad¹⁵, la medición se consolidó como un proceso empírico-teórico con el uso de instrumento de medición cada vez más precisos y refinados

¹⁵ Marshall Berman en su libro “*todo lo sólido se desvanece en el aire*” propone la modernidad como una condición cultural que pretende que la experiencia influya en el actuar de todas las personas del mundo. Escribe sobre las tres etapas de la modernidad: 1. etapa inicial: del renacimiento a la ilustración (siglo XVI al XVIII), 2. Etapa de consolidación: De la revolución francesa a la revolución industrial (siglo XVIII al XIX), 3. Periodo de apogeo y decadencia (Siglo XX al XXI). (Bergman, 1988).

que cumplieron con las necesidades de cada época. Mersenne y Riccioli, al experimentar con la isocronía del péndulo, pusieron a prueba hipótesis teóricas sobre la regularidad del movimiento oscilatorio. Esto conduce a pensar que medir es un procedimiento de intervención del experimentador en el fenómeno mediante la interacción con el instrumento de medición. El caso de Huygens y el reloj de péndulo profundiza aún más esta relación entre teoría y experimentación. La construcción de la curva cicloide como solución geométrica a la pérdida de isocronía del movimiento pendular con amplitudes grandes demuestra que la matematización es parte del proceso de medición. La experiencia adquirida en las observaciones sobre la falta de regularidad del movimiento oscilatorio, y la teoría sobre la geometrización del movimiento con las curvas tautócronas, se conjugaron en un aparato que redefinió la precisión de la medición de la duración de un segundo. Aquí la frontera entre lo empírico y lo teórico se diluyó completamente. Este entrelazamiento obligó a repensar la comprensión de la medición de la duración. No bastó con registrar datos experimentales: se necesitó comprender que dichos registros poseían valor significativo porque se inscribían como la base de una teoría que los interpreta. Este aspecto se ha olvidado en algunos escenarios académicos, donde se privilegia la toma de datos sin discutir los supuestos teóricos que los sustentan.

La metrología moderna con sus protocolos de trazabilidad e incertidumbre, formalizó este vínculo entre teoría y experimentación. El 20 de mayo de 2019 el BIMP (2019) el segundo se definió como *“la duración de 9192631770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio-133”*, el cual es una construcción teórica basada en la mecánica cuántica. El dato empírico al que denominaron frecuencia de radiación sólo es significativo porque existe un modelo físico que lo sustenta. Esta característica de la medición también plantea preguntas sobre objetividad. ¿Es la medición una copia fiel de la realidad o una construcción mediada por la carga teórica, la teoría y el instrumento?

En el marco del estudio de la medición de la duración en las prácticas experimentales, desde la perspectiva teórica se explica que un mismo instrumento produce resultados similares en diferentes contextos, a esto lo reconocemos como reproductibilidad

experimental. Si se construye un péndulo de un metro en Colombia y otro en cualquier país del mundo, ambos tendrán prácticamente el mismo periodo, salvo pequeñas diferencias influenciadas por la aceleración gravitacional terrestre de cada lugar. Esta concordancia confirma que un modelo teórico respalda a la práctica de medir. En síntesis, la medición es una acción inseparable de la teoría. El sentido común que ve en los datos una lectura directa de alguna realidad creada ignora la mediación conceptual e instrumental que hace posible toda experimentación. Reconocer este vínculo ha permitido comprender que las prácticas experimentales son un diálogo constante entre lo que especulamos y experimentamos.

1.3. La medición de la duración de un segundo como magnitud fundamental.

La constitución del segundo como magnitud fundamental de la duración responde a la posibilidad histórica de producir instrumentos cada vez más refinados y capaces de medir intervalos de duración cortos. Esto es lo que hizo del segundo un parámetro operativo central para la cinemática y, más tarde, para toda la ciencia moderna. Por ejemplo, Galileo al usar la clepsidra, demostró que describir trayectorias y velocidades requiere contar con la posibilidad de medir intervalo de duración regulares y cortos. Sin ese parámetro, el movimiento se convierte en una narración cualitativa. Así, la cuantificación de los resultados experimentales con base en la medición de la duración abrió la puerta para que la práctica experimental se relacione con estructuras matemáticas. La elección del segundo como unidad básica de la duración refleja una construcción histórica, inicialmente definido como la $\frac{1}{86400}$ parte del día solar medio, dependía de una interpretación imprecisa del fenómeno desde el punto de vista astronómico. Con la aparición del reloj de péndulo, se logró por primera vez un patrón instrumental de alta precisión, y siglos después la transición atómica al cesio-133 refinó el estándar. Cada etapa refleja la búsqueda de un proceso cada vez más estable.

El reconocimiento de la duración como magnitud fundamental también implica un debate sobre qué significa “fundamental”. No se trata de que el tiempo exista como “sustancia independiente”, sino de que sirve como punto de partida para definir otras magnitudes derivadas como velocidad, aceleración, frecuencia, potencia y energía, que

requieren de la duración como parámetro básico para poder ser evidenciadas. De allí que la duración no pueda ser desvinculada de la ciencia moderna, aunque su interpretación filosófica siga siendo objeto de discusión. Además, la duración se mide de manera directa a través de procesos regulares o que se repiten en la naturaleza. Aquí radica su diferencia con magnitudes como la longitud, que pueden compararse directamente con un patrón material. Esta diferencia según Moscovici (1967) convierte a la duración en un punto de estudio fenomenológico único: no se puede “ver” el patrón de la duración, solo contar ciclos o intervalos de procesos en los que la oscilación juega un papel importante. La duración se constituye como una magnitud en la medida en que se le liga a la repetición de eventos o fenómenos regulares, lo que explica por qué la periodicidad es el alma de los relojes.

La elección del segundo como magnitud fundamental muestra la estrecha relación entre teoría y experimentación mediante el instrumento. La definición actual de segundo, basada en la mecánica cuántica, pone de manifiesto que la física contemporánea depende de teorías abstractas para sostener su metrología. Medir duración hoy en día es medir frecuencias atómicas, algo que ningún observador percibe directamente. El segundo, por tanto, simboliza un triunfo de la abstracción matemática aplicada a la medición. Desde el punto de vista experimental la magnitud fundamental implica relacionar una definición producto de acuerdos y convenciones, y no de una acción que se genera de la experiencia sociocultural. La intención es comprender que lo que medimos son duraciones y que su regularidad depende de la estabilidad de los procesos que tomamos como referencia. Aclarar esto previene visiones ingenuas como pensar que el tiempo “fluye” independientemente de los fenómenos.

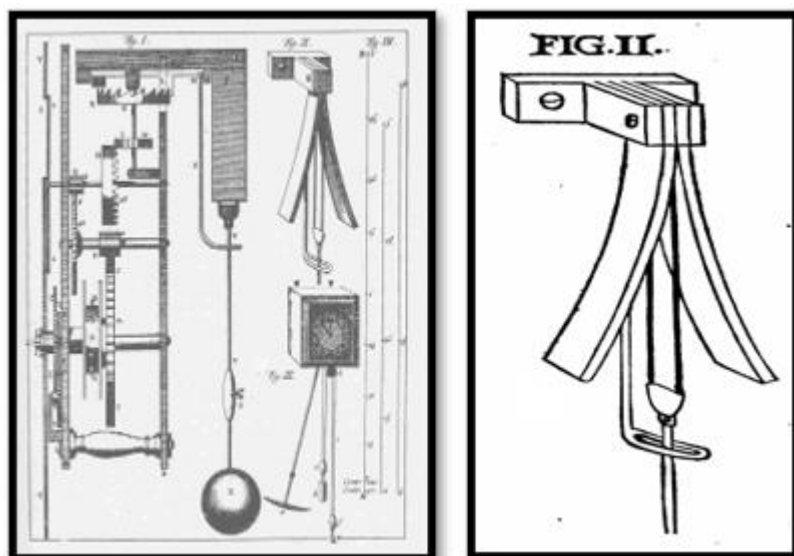


Imagen 3. Izquierda: la imagen muestra el diseño de los componentes del reloj de péndulo. Derecha: La figura II de la imagen muestra la forma de las láminas “mejillas” cicloidales diseñadas por Huygens. Imagen tomada de *HO*.

Una de las contribuciones más importante de Huygens en el *HO* es su demostración geométrica de que la cicloide es una curva tautócrona; es decir, que un objeto que descienda por esa curva llegará al punto más bajo con la misma duración independientemente de su punto inicial (altura). Esta propiedad le permitió diseñar un límite en las oscilaciones del péndulo mediante láminas “mejillas” cicloidales (Figura II, Imagen No. 3.) que forzaban al péndulo a moverse tangencialmente según la evoluta de la curva cicloide, logrando así una oscilación virtualmente isócrona. Con este fundamento, Huygens dedujo una longitud específica para un péndulo que marque dos segundos en una oscilación completa: aproximadamente de 3 pies parisinos y 8 ½ líneas, lo que equivale a unos 99,42 [cm].

La función de la duración como magnitud fundamental también destaca en la modelización matemática. En las ecuaciones de movimiento, el tiempo suele aparecer como variable independiente que organiza el resto de las magnitudes. Este uso formal refuerza su papel de eje estructurador en las ciencias naturales, pero también muestra que, al fin y al cabo, no es más que un recurso para parametrizar el desarrollo de los sistemas. Su estatus fundamental es, por tanto, operativo y funcional, más que fenomenológico. Es interesante notar que el segundo, como unidad de medida de la duración, ha tenido que transformarse

constantemente para responder a nuevas exigencias de precisión. La navegación marítima del siglo XVII, la astronomía del siglo XIX o la electrónica del siglo XX han mostrado que cada avance científico exige refinar la definición de esta magnitud fundamental. Esto, como lo indica Landes (2000) confirma que la ciencia no descubre patrones eternos, sino que fabrica convenciones cada vez más ajustadas a su época.

1.4. La historia de la medición de la duración en la cultura occidental.

La historia de la medición de la duración en la cultura occidental se remonta a dispositivos primitivos como relojes de sol, clepsidras y relojes de arena, que se utilizaron como instrumentos para medir la duración de los fenómenos mediante procedimientos artesanales. Estos instrumentos han servido para organizar la vida cotidiana, la agricultura y los rituales religiosos, pero no tuvieron ni han tenido aún el nivel de precisión requerido por la ciencia moderna. La medición de la duración ha sido un asunto práctico y simbólico, más que experimental. Blanché (1966) escribe sobre cómo Aristóteles concebía el tiempo como medida del movimiento según el “antes” y el “después”. Sin embargo, esta idea permaneció en el plano filosófico y no se tradujo en instrumentos precisos de medición. Aunque Arquímedes constituye una excepción parcial al elaborar dispositivos técnicos, la cultura griega no desarrolló la experimentación sistemática que ha caracterizado a la ciencia moderna.

Durante la edad media, los monasterios impulsaron la medición de la duración a través de relojes mecánicos rudimentarios ubicados en las catedrales o iglesias, necesarios para regular los momentos de oración. La medición de la duración comenzó a independizarse del ciclo solar para ser marcada por aparatos contruidos con incertidumbre humana. Además, estos relojes tenían una baja precisión: los mecanismos de escape de rueda de tipo verja y volante foliot (balancín) (Imagen No. 4) variaban con facilidad y solo presentaban un ensamble mecánico para medir las horas de manera aproximada, debido al desfase de hasta 15 minutos al día. El Renacimiento marcó un cambio radical porque Galileo experimentó con el péndulo y descubrió su regularidad aproximada, lo que ofrecía un nuevo recurso para medir intervalos de tiempo. El uso de la clepsidra muestra cómo la medición de

la duración podía ser operacionalizada de formas creativas, ligado a la práctica experimental con la invención técnica. En este período se gestó la transición hacia una duración medida con rigor.

Los relojes mecánicos con escape de rueda de tipo verja y volante foliot (balancín) representan una etapa intermedia en la historia de la relojería, es un punto de transición entre los antiguos relojes de peso y las formas más avanzadas de control del movimiento, como los relojes de péndulo. En estos mecanismos, la función reguladora recaía sobre un sistema compuesto por una barra o tubo metálico al que se unía un eje delgado que sostenía una lámina mediante un material elástico dispuesto en un ángulo determinado. Esta configuración permitía que los dientes de la última rueda —denominada “rueda de escape” o “rueda de avance”— se articularan con el balancín, el cual oscilaba horizontalmente (Imagen No. 4). Cada oscilación controlaba el paso del engrane, frenando su movimiento para evitar que la energía almacenada en las pesas o el resorte se liberara de manera súbita. De esta manera, el sistema lograba una regulación del flujo energético, convirtiendo el movimiento continuo en un avance rítmico medido.

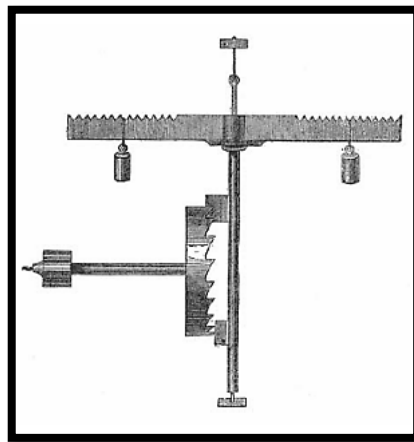


Imagen 4. Rueda de escape tipo verja y volante foliot (balancín). Imagen tomada de Laesser (2021).

Este diseño, conocido históricamente como rueda de escape tipo verja (del inglés *verge*, que significa borde), es considerado el primer mecanismo de escape documentado en

la relojería europea, aunque su inventor permanece desconocido¹⁶, su principio de funcionamiento se basaba en una alternancia de impulsos: la rueda de escape empujaba el balancín, que a su vez regresaba a su posición inicial bajo la acción elástica de su eje, generando así un movimiento periódico que permitía que la pesa descendiera lentamente, manteniendo un ritmo constante. Este freno mecánico dotaba al reloj de una cadencia estable, permitiendo que el engrane completo realizara una revolución cada doce o veinticuatro horas. El balancín con rueda de escape tipo verja no solo aportó una solución ingeniosa al problema de la regulación, sino que sentó los fundamentos conceptuales que sustentan el principio del “tiempo controlado”, en el que la periodicidad mecánica se erige como condición esencial para la medición precisa de la duración del segundo.

El siglo XVII trajo consigo la consolidación del reloj de péndulo gracias a Huygens. Este invento transformó la medición de la duración al proporcionar una precisión sin precedentes para aquella época. Por primera vez, se podían contar segundos de manera regular, lo que abrió la posibilidad de usar el instrumento en la experimentación científica. El reloj de péndulo de Huygens fue un avance técnico, y un hecho sociocultural que modificó la comprensión de la medición de la duración. Experimentos como los de Mersenne y Riccioli mostraron que el péndulo podía servir tanto para medir duraciones como para estudiar leyes físicas; este argumento surge de las diferentes prácticas experimentales realizadas para calcular durante el día y la noche la cantidad de oscilaciones del péndulo con base en la modificación de factores ambientales y técnicos (como amplitud del ángulo de oscilación, longitud del péndulo, peso de la péndola, entre otros). Según Koyré (1981), Huygens logró repetir el último experimento desarrollado por Mersenne presentado en su

¹⁶ Hasta el siglo XVII, la mayoría de los relojes mecánicos, como el de la catedral de *Wells*, utilizaban un volante foliot y una rueda de escape tipo verja para mantener un ritmo constante. Descripción: La rueda dentada en forma de corona gira en sentido antihorario mediante un paso que cuelga de una cuerda enrollada alrededor del eje horizontal. Este movimiento está controlado por las placas planas (*paletas*) fijadas en el eje vertical (*o verja*) sobre las cuales hay una barra tipo balancín (*o foliot*) con pesas colgantes en cada extremo. Las paletas engranan con los dientes de la corona. La verja gira hasta que la paleta inferior se topa con el diente inferior, que la empuja en la dirección opuesta. El tiempo de cada oscilación en este mecanismo se controla moviendo la posición de las pesas ubicadas en el foliot.

libro *Reflexiones* publicado en 1647, en donde indica el proceso con el que experimenta el movimiento pendular¹⁷. La medición de la duración de los fenómenos dejó de ser un telón de fondo para convertirse en un acto principal, que posibilitó la estructuración del conocimiento científico en el que la ciencia moderna se presenta como la posibilidad de medir intervalos de duración de manera objetiva.

En el siglo XVIII, la precisión de los relojes mejoró con mecanismos de escape cada vez más refinados y con la incorporación de resortes espirales. Esto aportó a la expansión de la navegación marítima, pues el cálculo de la longitud recorrida en el mar dependía de medir con precisión la diferencia horaria. La historia muestra una interdependencia entre ciencia, tecnología y necesidades sociales. Posteriormente en el siglo XIX, se consolidó la noción de duración como variable astronómica y social (Dohrn-van Rossum, 1996). La invención de los cronómetros marítimos, la estandarización de husos horarios y la coordinación ferroviaria mostraron cómo la medición de la duración pasó a ser un recurso de organización social. La medición ya no solo abordaba cuestiones científicas, sino también políticas y económicas. La historia de la cultura occidental destaca momentos interesantes como los eventos relacionados al desarrollo de la medición de la duración y la historia de la relojería del siglo XVII.

Luego los siglos XX y XXI trajeron consigo cambios de paradigmas aún mayores: los relojes de cuarzo, atómicos y ópticos. La transformación de la medición de la duración mediante la comprensión de fenómenos mecánicos a procesos electromagnéticos y cuánticos elevaron la precisión a niveles jamás imaginados. La definición actual del segundo muestra que la medición de la duración es una historia de progresiva abstracción, en la que cada avance reemplaza un fenómeno macroscópico por otro más estable y trazable. La historia de

¹⁷ Teniendo en cuenta la falta de recursos experimentales para la época, con un péndulo de cuerda sujeto a la pared Mersenne toma dos bolas de plomo sostenidas en la misma mano, al soltarlas la simultaneidad de las llegadas de las dos bolas, proyectadas una contra el muro y la otra contra el suelo, permiten determinar mediante la coincidencia de los dos sonidos producidos por los choques, Según *Koyré (1981)* es curioso observar que Huygens utilizando exactamente el mismo procedimiento que Mersenne, obtiene mejores resultados.

la medición de la duración en occidente revela un proceso de creciente abstracción y precisión. Desde el flujo del agua hasta la vibración del cesio, la duración se ha convertido en una magnitud científica que cambia al compás de los instrumentos con la que se mide.

Capítulo 2. La medición de la duración, los recursos experimentales y la ciencia moderna.

*“¿Deberíamos conformarnos con una interpretación instrumentalista de la realidad?”
(Reyes, 2025)*

En el capítulo anterior, se ha sostenido que la medición es una operación teórica e instrumental que aporta a la configuración de magnitudes físicas. En particular se ha mostrado que la duración no es un dato que se derive de la experiencia inmediata, más bien es una construcción que emerge en la interacción entre concepto, experimento e instrumento.

Para continuar con el análisis que nos hemos propuesto, retomamos varios de los puntos expuestos en la filosofía de Robert Blanché (1966) quien examina el método experimental en la física ligado a la sistematización de las experiencias científicas y a la incorporación de instrumentos para comparar y cuantificar fenómenos de estudio.

2.1. Galileo Galilei y el uso del péndulo para medir la duración de la caída de los cuerpos.

El uso del péndulo por Galileo Galilei para medir la duración de la caída de los cuerpos tanto en caída libre como por planos inclinados, constituye uno de los episodios más célebres en la historia de la ciencia moderna. Según los relatos, Galileo observó la regularidad de las oscilaciones en el movimiento de vaivén de una lámpara en la catedral de Pisa, a partir de esta observación, Galileo incorporó el péndulo como instrumento de medición de la duración en sus prácticas experimentales (Koyré, 1981). El péndulo le permitió a Galileo superar las limitaciones de la clepsidra, cuya precisión era relativa; con un péndulo simple se podían dividir intervalos de duración en fracciones regulares, lo que facilitaba medir la rápida caída de los cuerpos en planos inclinados. La oscilación periódica se convirtió, así, en una especie de “reloj natural” que introducía un patrón comparable para la experimentación. El paso de la intuición a la operacionalización de la experiencia fue un avance importante en la ciencia moderna.

El péndulo no fue solo un recurso o “pieza” fundamental del procedimiento; para Galileo, este instrumento fue también un objeto de estudio. Al analizar sus oscilaciones, pudo establecer relaciones matemáticas entre la longitud del hilo y el periodo del movimiento. Esto le permitió formular principios que vinculan directamente la geometría con la duración de la oscilación. De esta manera, el péndulo inauguró la posibilidad de aplicar la matemática en un fenómeno físico concreto. Un aspecto notable es que Galileo usó el péndulo tanto para medir como para enseñar. En sus lecciones, lo presentó como ejemplo de regularidad natural, mostrando a sus seguidores que la naturaleza podía ofrecer patrones confiables, que luego él mismo refutó. Galileo con su particular forma de enseñar y presentar sus experiencias se adelantó a su tiempo al integrar el experimento con la demostración conceptual, lo que dió a sus explicaciones un carácter innovador frente a la tradición escolástica.

La historia del péndulo en las prácticas experimentales de Galileo muestra cómo un instrumento utilizado para la medición de la duración puede reconstruir preguntas científicas. Antes de su uso, la caída de los cuerpos era descrita cualitativamente como “más rápida” o “más lenta”. Con el uso del péndulo, esas descripciones se transformaron en intervalos medibles, lo que permitió formular leyes cuantitativas. El péndulo, en este sentido, abrió el camino para la conversión de la física en una ciencia experimental sistemática. El ingenio de Galileo consistió en adaptar el péndulo a diferentes condiciones experimentales. Utilizó hilos de distintas longitudes, masas variadas y ángulos diferentes para probar la regularidad de la oscilación. Su insistencia en repetir los ensayos refleja un cambio metodológico decisivo, que se traduce en que el conocimiento ya no era producto de experiencias aisladas, sino de la acumulación sistemática de resultados comparables.

Después de Galileo, es Huygens quien logra construir un reloj de péndulo funcional. Sin embargo, las observaciones de Galileo fueron la base conceptual para que otros investigadores vieran en el péndulo un recurso no sólo experimental, sino también técnico. De esta manera, Galileo sembró la semilla de una innovación que transformaría la medición de la duración de un segundo por medio de la oscilación de un péndulo en los años siguientes. La historia del uso del péndulo por Galileo también es un caso de transición de la cualidad a

la cantidad. Cuando se observa que un péndulo de 1 [*metro*] oscila casi con la misma duración que uno de 90 [*centímetros*], se percibe que la naturaleza ofrece regularidades cuantificables. Esta experiencia concreta conecta la historia de la ciencia con la comprensión de la medición de la duración.

El péndulo de Galileo también muestra que la observación atenta de fenómenos cotidianos puede abrir puertas hacia nuevos conocimientos. Galileo supo transformar una simple experiencia visual en una herramienta científica de enorme alcance. Este hecho resalta la importancia de la creatividad y la curiosidad en el proceso de construcción del conocimiento científico. El péndulo emprendió la posibilidad de cuantificar duraciones con precisión, abriendo el camino a la física como disciplina experimental.

2.2. Marín Mersenne y Johannes Baptista Riccioli: experiencias sobre la isocronía del péndulo.

A la par de las observaciones de Galileo sobre el movimiento oscilatorio como instrumento para la medición de la duración, Marín Mersenne y Johannes Baptista Riccioli desempeñaron un papel decisivo en la sistematización de las experiencias sobre el movimiento oscilatorio del péndulo. Ellos estudiaron la isocronía del péndulo, es decir, si el periodo del péndulo se mantenía constante independientemente de la amplitud. Mersenne, conocido como el “secretario de la república de las letras”, se interesó por el péndulo no solo como objeto de estudio físico, sino como instrumento para mejorar la precisión de la medición de los tiempos musicales. Sus estudios lo llevaron a concluir que el periodo del péndulo depende de la longitud del hilo. Aunque sus fórmulas no eran exactas, sentaron las bases para cálculos posteriores más sofisticados.

Riccioli, por su parte, llevó a cabo experimentos aún más detallados, registrando la duración de la oscilación de péndulos y comparándolos con cálculos matemáticos teóricos. Descubrió que la isocronía no era perfecta, sino aproximada, además que con amplitudes grandes el periodo variaba ligeramente. Este hallazgo fue fundamental porque obligó a los

investigadores a reconocer los límites del péndulo como reloj natural y propuso la necesidad de buscar soluciones geométricas, como la solución de la cicloide propuesta posteriormente por Huygens. La sistematización de Mersenne y Riccioli representa un avance metodológico en la historia de la ciencia. Ya no se trataba de observaciones aisladas, sino de experimentos cuidadosamente diseñados, repetidos y registrados con precisión. Esta insistencia en la replicabilidad anticipó los principios modernos del método experimental, mostrando cómo el péndulo se convirtió en un laboratorio en miniatura, y una pieza fundamental para desarrollar procedimientos en el estudio de las leyes del movimiento.

Es significativo que tanto Mersenne como Riccioli presentan sus resultados en obras enciclopédicas. Sus escritos no sólo difundieron el conocimiento sobre el movimiento oscilatorio del péndulo, sino que también ofrecieron un modelo de cómo debía sistematizarse la experimentación científica. La publicación de datos, la descripción de instrumentos de medición y la comparación de resultados fueron condiciones prácticas que fortalecieron la comunidad científica (Koyré, 1981). El análisis de la isocronía del movimiento pendular realizado por estos investigadores también muestra la importancia del error experimental como fuente de conocimiento. Al descubrir que las oscilaciones largas no eran exactamente iguales a las cortas, pusieron de manifiesto que las mediciones nunca podrán ser como se esperan. En lugar de ver esto como un fracaso, lo interpretaron como oportunidad para refinar la teoría y los instrumentos de medición. Este cambio de perspectiva fue clave para la madurez de la ciencia moderna.

La sistematización de las experiencias de Mersenne y Riccioli tuvo un impacto en la naciente ciencia moderna del siglo XVII, ya que sus experimentos podrían ser replicables por otros investigadores, lo que facilitó la verificación y la difusión de los métodos científicos modernos. De hecho, sus descripciones sirvieron como manuales prácticos para generaciones de científicos que así mismo, contribuyeron con datos e información de las experiencias científicas. Estos autores muestran que la ciencia ha avanzado tanto corrigiendo errores como confirmando hipótesis. Desde la perspectiva de Nagel (1981) el conocimiento científico no aparece de golpe, sino que se construye a partir de una cadena de aproximaciones sucesivas.

Los resultados de los trabajos de Mersenne y Riccioli circularon entre teóricos y experimentalistas europeos, quienes discutieron, replicaron y ampliaron las experiencias. El péndulo se convirtió en un tema de investigación compartido que fortaleció las redes de correspondencia entre científicos. La ciencia moderna se consolidó así no sólo por ideas, sino por prácticas colaborativas protagonizadas por la medición. La sistematización de las experiencias de Mersenne y Riccioli respecto al péndulo representó un paso decisivo hacia la consolidación de la física como ciencia moderna. Estos estudios han demostrado que la isocronía del péndulo se ha interpretado como una propiedad aproximada que abrió el camino a innovaciones posteriores como el reloj de péndulo de Huygens. El rigor experimental y la publicación sistemática de datos marcaron un modelo que todavía define la manera de hacer ciencia en la actualidad.

Capítulo 3. El reloj de péndulo de Christiaan Huygens

“Se han construido objetos de conocimiento que son el resultado de las acciones de ciertas personas para conocer el mundo y entenderlo como un sistema complejo”. (Reyes, 2025)

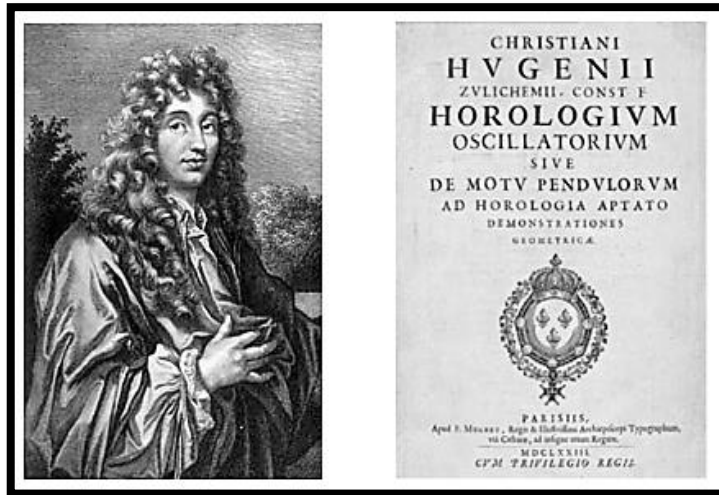


Imagen 5. Huygens y la portada de la primera edición del "*Horologium Oscillatorium*" publicado en 1673. Imagen tomada de HO.

El péndulo simple no puede ser considerado como una medida del tiempo segura y uniforme, porque las oscilaciones amplias tardan más tiempo que las de menor amplitud; con ayuda de la geometría he encontrado un método, hasta ahora desconocido, de suspender el péndulo; pues he investigado la curvatura de una determinada curva que se presta admirablemente para lograr la deseada uniformidad. Una vez que se aplicó esta forma de suspensión a los relojes, su marcha se hizo tan pareja y segura, que después de numerosas experiencias sobre tierra y agua, es indudable que estos relojes ofrecen la mayor seguridad a la astronomía y a la navegación. La línea mencionada es la misma que describe en el aire un clavo sujeto a una rueda cuando ésta avanza girando; en la matemática se le denomina cicloide, y ha sido cuidadosamente estudiada por su aplicación a la medida del tiempo ya

mencionada, que descubrí mientras la estudiaba con interés puramente científico, sin sospechar el resultado (Huygens, 1673, p. a2r)¹⁸.

3.1. El *Horologium Oscillatorium* publicado en 1673.

El *HO* es un tratado originalmente escrito en latín clásico con notas y advertencias en francés (por parte de la editorial de la época); su título es: *Horologium Oscillatorium, sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*, que traducido al español es: *El reloj oscilatorio, demostraciones geométricas sobre el movimiento de los péndulos aplicado a los relojes*; fue escrito por Christiaan Huygens, físico, matemático y astrónomo neerlandés. Miembro de la Real Sociedad de Londres y uno de los científicos más sobresalientes del siglo XVII. Publicado en el año 1673 (MDCLXXIII), en París, Francia, por la editorial Apud F. Muguet, tipógrafo del Rey y del Arzobispo de París.¹⁹ (Imagen No. 5).

El tratado *HO* es una obra de dominio público, y se ha utilizado como uno de los documentos estructurales y fuente directa de información de la presente propuesta. Se ha utilizado una copia digitalizada por Google de un ejemplar antiguo, con marcas y anotaciones visibles del volumen físico original publicado para dicha época. Se encuentra en estado de conservación documental aceptable, aunque algunas partes presentan deterioro y en algunas páginas se dificulta la lectura a causa del paso del tiempo. La obra es tipo libro

¹⁸ El pasaje citado se sitúa al inicio del prefacio del *Horologium Oscillatorium* y cumple un papel estratégico en el tratado porque justifica la necesidad de una solución geométrica que supere las limitaciones naturales del péndulo simple. Es la puerta de entrada conceptual a todo el tratado. La cita mencionada aparece en la página a2r (recto de la hoja a2) del prefacio. En la edición de 1673 la paginación del prefacio no es arábica. El prefacio utiliza signaturas tipográficas en lugar de números de página, una práctica típica del siglo XVII.

¹⁹ Es importante tener en cuenta, con el ánimo de no confundirnos, que el 06 de septiembre de 1658 Huygens publicó *Horologium*, el antecedente directo del *Horologium Oscillatorium*, y en esta fecha envió 60 copias a personajes influyentes tanto en Holanda como en otros países de Europa.

científico, tratado matemático-físico, tema enmarcado en la mecánica de los relojes y compuesto por 179 páginas.

El documento se presenta en cinco partes o capítulos, y es una de las primeras obras en aplicar rigurosamente el cálculo geométrico a problemas enmarcados en la mecánica, además representa una transición clave desde la mecánica cualitativa galileana hacia una mecánica cuantitativa y sistematizada, precursora del pensamiento Newtoniano. En la primera parte se presenta una descripción del diseño y funcionamiento del mecanismo del reloj de péndulo, con dibujos y explicaciones detalladas. En la segunda parte se presenta un estudio del descenso de los cuerpos pesados y su movimiento desde el punto de vista cicloidal, en donde se analiza matemática y geoméricamente la trayectoria de la cicloide como curva tautócrona e isócrona. En la tercera parte se trata la envolvente y las dimensiones de líneas curvas, tratando la evoluta de curvas cicloides e incluyendo propiedades geométricas fundamentales. En la cuarta parte, Huygens escribe sobre lo que se considera como un estudio pionero en cuanto a la relación del concepto físico de centro de oscilación. Y la quinta parte, en donde propone la construcción de otro reloj con movimiento pendular circular, en donde se discuten algunas alternativas para la aplicación de la cicloide, considerando el movimiento circular del péndulo y desarrollando teoremas sobre la fuerza centrífuga.

Es de gran importancia centrarnos en la primera parte del documento en donde se describen las características técnicas del reloj de péndulo diseñado por Christiaan Huygens y construido por Salomon Coster en el año 1656. En esta sección Christiaan Huygens desarrolla un análisis detallado sobre las propiedades geométricas de la curva cicloide, que, al aplicarse a mecanismos de relojería, funcionan adecuadamente tanto en tierra como sobre el mar, independientemente del oleaje. Estas propiedades y otras más se presentan y describen en las siguientes partes del tratado, especialmente la idea de tautocronía y la determinación de la evoluta, la tangente en cualquier punto de la curva evoluta, los centros de curva, entre otros. El documento se publicó 17 años después de que Christiaan Huygens presentara por primera vez el reloj de péndulo. Un reloj que se consolidó como un instrumento clave para la medición de la duración, debido a su capacidad para medir

intervalos de duración con resolución de un segundo mediante movimientos oscilatorios regulares y predecibles, y presentando una precisión sin precedentes al basarse en la isocronía de las oscilaciones.

Además de las características mencionadas en el tratado, en la presente propuesta se presentan otros avances complementarios como el mecanismo de escape, que en un principio fue vertical tipo verja y luego tipo áncora (Imagen No. 6); la construcción de la cicloide desde una perspectiva geométrica permitió la estandarización de la duración del segundo como unidad de medida; y posteriormente la transformación en la comprensión de la medición de la duración a nivel científico y sociocultural (Landes, 2000). El impacto del reloj de péndulo trascendió su función técnica, convirtiéndose en un instrumento fundamental para analizar fenómenos, al posibilitar la medición de la duración, y colocar esta actividad en esferas de estudio más avanzadas y complejas; además contribuyendo en la validez de las leyes de la mecánica clásica propuestas por Sir. Isaac Newton. En astronomía, los relojes de péndulo facilitaron el cálculo matemático de las posiciones planetarias, contribuyendo al mejoramiento de las técnicas utilizadas en la navegación marítima. Además, el movimiento oscilatorio del péndulo consolidó la noción de intervalos de tiempo cronológicos como una categoría medible, (Whitrow, 1988).

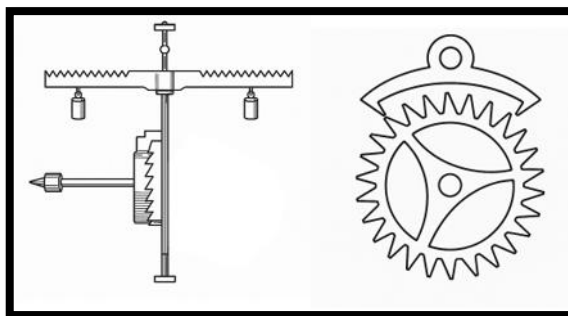


Imagen 6. Escape tipo verja (Izquierda), Escape tipo áncora (Derecha). Imagen propia.

Inspirado en las observaciones y mediciones sistematizadas de Galileo Galilei, Marin Mersenne y Johannes Baptista Riccioli sobre la isocronía del movimiento pendular, Christiaan Huygens logró diseñar un mecanismo funcional combinando el movimiento oscilatorio del péndulo, con un sistema de engranes, unas láminas “mejillas” cicloidales, un

mecanismo de escape y un peso (Laesser, 2021). Con la construcción del reloj de péndulo, la medición de la duración mejoró drásticamente, alcanzando márgenes de error de apenas unos segundos al día.

Esta reconstrucción histórica no pretende explicar el fenómeno de la duración tal como aparece hoy en una práctica experimental contemporánea, sino mostrar las condiciones técnicas, conceptuales y operativas que hicieron posible su configuración. Con esta distinción se prepara el paso hacia un nivel de análisis diferente: el fenomenológico. En él no se busca describir lo que Galileo, Mersenne o Huygens pensaron sobre el tiempo, sino comprender cómo el fenómeno de la duración se presenta para un sujeto que experimenta con un instrumento.

El tratado *HO* es considerado uno de los más importantes de la ciencia del siglo XVII, a la par con los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Newton. Este tratado no sólo describe el diseño del reloj de péndulo, sino que ofrece una fundamentación geométrica rigurosa acerca del movimiento oscilatorio y sus aplicaciones en los mecanismos de relojería. Huygens logró en esta obra un doble propósito: legitimar el péndulo como regulador de la duración de un segundo y, al mismo tiempo, introducir el reloj de péndulo como instrumento fundamental en los procedimientos experimentales. El tratado, por tanto, trasciende la relojería y se convierte en un referente fundacional de la mecánica. Desde el inicio del texto, Huygens establece una conexión explícita entre el reloj de péndulo y la aspiración científica de obtener medidas temporales precisas. El *HO* ilustra cómo un problema técnico — hacer que la oscilación de un péndulo sea isócrona — se convierte en la posibilidad sobre la que la medición de la duración de un segundo permite un estudio detallado desde la perspectiva de la geometría de las curvas.

Uno de los aportes sobresalientes del tratado es el estudio detallado de la cicloide como curva tautócrona y posibilitadora del isocronismo del péndulo. Huygens demuestra matemáticamente que la cicloide permite que las oscilaciones del péndulo se mantengan isócronas, independientemente de la amplitud del péndulo. Esta demostración muestra cómo un concepto geométrico puede resolver un problema físico. Además, constituye un ejemplo

temprano del uso de la matemática como recurso predictivo y descriptivo, anticipando el espíritu de la ciencia moderna en la que la abstracción matemática se convierte en guía de la experimentación. En el *HO*, Huygens introduce también el concepto de evoluta para analizar las propiedades de la cicloide. Con ello, inaugura un lenguaje geométrico más sofisticado que será retomado por matemáticos posteriores en el desarrollo del cálculo diferencial (Koyré, 1983). La introducción de esta noción muestra cómo la búsqueda de soluciones prácticas — refinar el mecanismo de un reloj — generó al mismo tiempo innovaciones teóricas con un impacto duradero en la historia de la ciencia. En este sentido, el tratado muestra la interdependencia entre ciencia pura y aplicada.

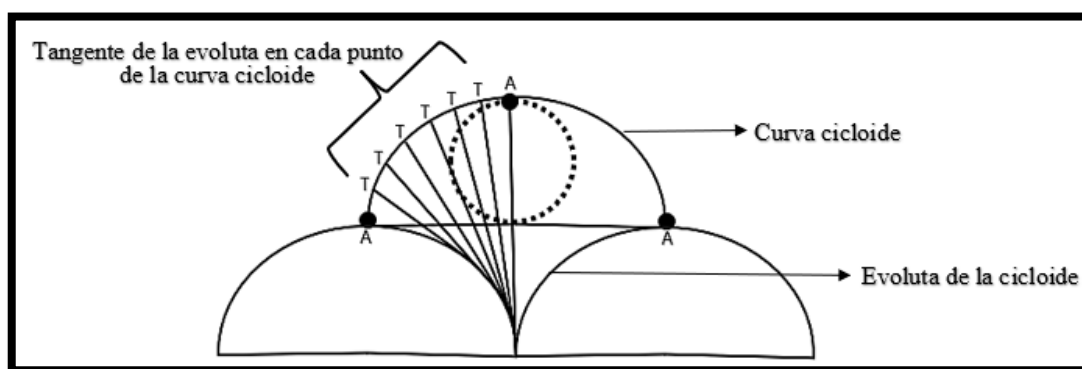


Imagen 7. La imagen muestra una curva cicloide generada por la rotación de una circunferencia y sus respectivas evolutas; Cada una de las líneas tangentes muestran el recorrido del péndulo si se toman las “mejillas” cicloidales como limitantes que permiten generar una ruta cicloidal. Imagen propia.

Desde un punto de vista histórico interpretativo, el *HO* representa la materialización del ideal galileano al sistematizar y matematizar la experiencia. En este tratado Huygens muestra que un fenómeno físico tan cotidiano como la oscilación de un péndulo puede ser representado mediante curvas (Imagen No. 7.) , que evidencian la idea de que la realidad física está regida por leyes matemáticas universales, y paralelamente refuerza la confianza en los instrumentos de medición como puente entre teoría y experimentación; el tratado también refleja una concepción diferente de la temporalidad: con Huygens, el tiempo se fraccionó en intervalos regulares y comparables, transformándose en una magnitud objetiva. Este cambio en la comprensión sobre la medición de la duración del segundo fue

fundamental para la consolidación de la cinemática y la dinámica, ya que permitió definir conceptos como velocidad, aceleración y fuerza en términos matemáticos.

En la obra de Huygens se desarrollan análisis de datos con base en las prácticas experimentales sobre la caída de los cuerpos, la dinámica del centro de oscilación y la teoría de las fuerzas centrífugas. Estos aportes lo convierten en un tratado precursor de la mecánica. Aunque Newton superaría sus propuestas con el sistema general de las leyes del movimiento, es innegable que Huygens abrió el camino al introducir una matemática rigurosa del movimiento, bien fundamentada experimentalmente. El *HO* es una obra de mecánica aplicada en donde Huygens combina demostraciones geométricas con descripciones de experimentos, logrando un estudio equilibrado entre teoría y experimentación. Esta forma de argumentación refleja el modelo de ciencia experimental defendido por epistemólogos como Robert Blanché, Alexandre Koyré y Serge Moscovici quienes resaltan la importancia de los instrumentos de medición en la consolidación de la física como ciencia.

El impacto del *HO* se sintió de inmediato en la comunidad científica europea. Fue leído y comentado por matemáticos, astrónomos y filósofos, quienes encontraron en este tratado un ejemplo de cómo debía estructurarse una ciencia rigurosa. Su influencia se extendió al desarrollo del cálculo, la mecánica y la relojería de precisión. Más allá de sus aplicaciones directas, el tratado consolidó un nuevo estilo de investigación en el que los problemas prácticos eran vistos como puertas de entrada a descubrimientos teóricos de gran alcance. El *HO* representa la convergencia entre matemática, física e instrumentación en torno a un problema común: la regularidad en la medición de la duración de la oscilación del péndulo.

3.2. Contexto histórico del siglo XVII: Holanda como epicentro de la ciencia y la técnica.

Los relojes mecánicos de antes de 1656, apoyados en el volante foliot (balancín), presentaban irregularidades notorias que impedían su uso en observaciones astronómicas o cálculos marítimos de alta exigencia. El movimiento pendular aportó un oscilador regular, previsible y repetitivo, a los mecanismos de relojería ya establecidos; esto permitía

fraccionar las horas y los minutos en partes iguales, estableciendo la base técnica de lo que luego se convertiría en el segundo (Wineland, 2013).

Holanda era entonces un centro de poder económico, científico y cultural, con una fuerte tradición en la construcción de instrumentos de precisión, desde lentes para uso óptico en astronomía hasta relojes mecánicos con diferentes tipos de características y usos. Las necesidades de la navegación marítima más allá de lo conocido geográficamente para aquella época, clave para el comercio y la expansión colonial, demandaba cronómetros precisos y confiables, ya que la determinación de la longitud del desplazamiento en el mar dependía de la medición de intervalos de duración confiables. Así, el reloj de péndulo surgió de un entrelazamiento técnico y científico (Burton, 1992), respondiendo a necesidades prácticas y, al mismo tiempo, a preguntas científicas sobre la aplicación de la regularidad de la naturaleza en la medición de la duración.

La figura de Huygens debe entenderse desde los aportes realizados a la comunidad científica del siglo XVII. Él fue quien logró en este sentido convertirse en un puente entre la teoría física y la técnica mecánica relojera, transformando una hipótesis geométrica en una realidad material que revolucionó la práctica científica. El reloj de péndulo debe ser visto como parte de un entramado de innovaciones que definieron a la física como una ciencia. El telescopio de Galileo, el microscopio de Leeuwenhoek y el barómetro de Torricelli formaban parte de una misma tendencia: la creación de instrumentos que extendían las capacidades humanas para observar, medir y sistematizar fenómenos. En este contexto, el reloj de péndulo de Huygens se convirtió en un referente para la experimentación porque hizo posible estabilizar intervalos regulares de duración, producidos artificialmente mediante un diseño geométrico y mecánico específico. Estos intervalos fueron asociados posteriormente con la división sexagesimal del tiempo, aunque en el siglo XVII aún no existía una definición metrológica del segundo como unidad física. La relevancia del dispositivo no radica en medir segundos en el sentido moderno, sino en ofrecer una regularidad instrumental que transformó la física experimental, la navegación y la astronomía.

Es importante destacar que el reloj de péndulo no fue un producto puramente individual, sino el resultado de la colaboración entre Huygens y el hábil relojero Salomon Coster, quien fabricó el primer prototipo en La Haya bajo la supervisión del mismo Huygens. Esta interacción entre el saber teórico del físico y la experticia técnica del artesano resalta la dimensión colectiva de la innovación científica. La historia del reloj de péndulo ilustra cómo la ciencia se ha desarrollado entre la intersección del conocimiento abstracto y destreza manual, lo que hace imposible separar completamente la ciencia de la técnica en el siglo XVII²⁰.

El primer reloj de péndulo construido por Coster²¹ bajo la dirección de Huygens incorporó un sistema de escape que permitía transmitir la energía del péndulo hacia el piñón principal, y desde este hacia el tren de engranes, manteniendo sus oscilaciones sin detenerse. La clave residía en que el péndulo, al ser más estable que el volante foliot (balancín), imponía su regularidad al mecanismo en lugar de recibir irregularidades de este. De este modo, la relojería adquirió una precisión nunca alcanzada, llegando a un error de apenas algunos segundos por día, frente a los errores de media hora o más, que caracterizaban a los relojes anteriores. La invención de Huygens debe entenderse también como un logro colectivo; la colaboración entre científicos y artesanos relojeros fue indispensable, la teoría vinculada al péndulo y su isocronía fue bien conocida en el ámbito académico, pero sin la destreza técnica de los relojeros, hubiera resultado complicado diseñar piezas ajustadas y engranes adecuados para sostener su movimiento. Esto demuestra que la ciencia del siglo XVII debe entenderse

²⁰ *Ahasuerus Fromanteel* pertenecía a una numerosa familia de relojeros de Londres, En 1657, se enteró de la invención del reloj de péndulo y envió a su hijo *Johannes* a Holanda, donde trabajó con *Salomon Coster* desde septiembre de 1657 hasta mayo de 1658. Al regresar a Londres, la familia *Fromanteel* construyeron los primeros relojes de péndulo de Inglaterra, anunciados en el *Mercurius Politicus* el 27 de octubre de 1658.

²¹ *Salomon Coster* muere en 1659 sin aportar desarrollos significativos de su parte hacia el reloj de péndulo, pero tampoco se aprecian desarrollos o avances por parte de sus sucesores (*Oosterwijck, Visbagh, Hanet y Reijnaert*). Sin embargo, en Inglaterra, los desarrollos son rápidos y evidentes. Allí los relojes se refinaron mediante el aumento de la duración de la medición, añadiendo funciones de sonería y música, calendarios y otras complicaciones; y por supuesto, tras algunos años, la aplicación del escape tipo áncora.

como un entretejido de saberes prácticos, oficios especializados y redes de intercambio de conocimientos (Edwardes, 1977).

Para finales de 1657 Salomon Coster ya comercializaba los relojes de péndulo con el permiso de Huygens, esto se evidencia mediante un anuncio comercial detallado que apareció el 22 de diciembre de 1657, en la edición No. 51 del *Tijdinghe*²²:

En La Haya, en el taller de Salomon Coster, se están fabricando y pronto estarán disponibles, con una patente de 20 años, ciertos tipos de relojes, tanto con resorte como con peso, según la invención del Sr. Christiaan Huygens, que miden el tiempo con mucha más precisión y exactitud de lo que hasta ahora se había logrado con cualquier obra, ya que no se verán alterados ni por cambios en el clima o el viento, ni por pequeñas imperfecciones en el resorte o las ruedas; además, esta invención es tal que puede añadirse fácilmente a algunos mecanismos especiales ya fabricados, para corregirlos, sin importar lo mal que hayan funcionado antes, y es especialmente útil para relojes de torre, donde puede añadirse sin mucho problema dependiendo de la configuración de los movimientos: lo que ya se ha probado. Cabe entender que todo esto se refiere a relojes de pared y de pie, ya que esta invención no es aplicable a relojes de bolsillo²³ (Huygens, 1658/2004, p. 12).

Además, la influencia del reloj de péndulo en la astronomía fue inmediata, los astrónomos encontraron en este instrumento un aliado para realizar observaciones más precisas de los movimientos presentes en la mecánica celeste, calcular posiciones estelares y predecir eclipses con un nivel de precisión inédito hasta entonces. De hecho, la posibilidad de comparar mediciones astronómicas realizadas en distintos lugares dependía de la confiabilidad de la medición de la duración registrado por relojes de péndulo. Así, el invento

²² Pioneros de la prensa impresa holandesa en cabeza de su editor *Broer Janz* quien publicó la primera edición del *Tijdinghe* en el año 1619. La edición No. 51 fue publicada por la *viuda de Broer Janz* en 1657.

²³ Este anuncio evidencia el papel de *Salomon Coster* como figura clave en la introducción y comercialización del reloj de péndulo, reafirmando su colaboración con *Huygens* en la realización práctica de esta invención.

de Huygens tuvo impacto en la física, cosmografía, cartografía y navegación marítima, áreas de estudio e investigación que exigían mediciones rigurosas de los intervalos de duración.

El contexto religioso y filosófico de la época también fue relevante para entender la importancia del reloj de péndulo. La metáfora del universo como un gran reloj, muy difundida en el siglo XVII, encontró en la invención de Huygens una materialización casi literal. El movimiento oscilatorio regular generado por el vaivén del péndulo parecía reflejar el orden y la armonía de la creación divina, ofreciendo un modelo tangible de regularidad natural. En este sentido, el reloj de péndulo reforzó concepciones filosóficas y teológicas sobre la racionalidad del cosmos, al mismo tiempo que servía como instrumento práctico para medir la duración de los fenómenos.

El reloj de péndulo también tuvo un profundo impacto social. Su incorporación en la modificación de los relojes de las torres de iglesia²⁴, en castillos y en las oficinas de los nacientes escenarios de producción industrial, transformó la organización de la sociedad en la cotidianidad, imponiendo una comprensión de la medición de la duración desconocida en épocas anteriores.

La importancia del reloj de péndulo debe evaluarse también en relación con la metrología, hasta su aparición, la medición de la duración no contaba con un patrón estable, ya que en los relojes de volante foliot (balancín) variaba la medición según la temperatura y otros factores ambientales, el desgaste de las piezas y las condiciones de uso. El péndulo isócrona, al ofrecer un patrón físico relativamente independiente de estas variables, se convirtió en la base para definir unidades de tiempo comparables en diferentes contextos. Este logro se inscribe en la larga búsqueda de estándares que caracteriza a la ciencia moderna y que continúa en la actualidad con los relojes atómicos y ópticos.

²⁴ El 26 de diciembre de 1657 *Huygens* le escribe a *Boulliau* que está ocupado con la conversión del reloj de péndulo de la torre de *Scheveningen*, cuya longitud y masa, para aquella época, era de casi 21 [ft] y 50 [lb] respectivamente.

La importancia de la correspondencia científica en el diseño y construcción del reloj de péndulo también merece mención. Huygens mantuvo comunicación con estudiosos de alto nivel de toda Europa²⁵, difundiendo noticias sobre su invención y discutiendo sus aplicaciones. Estas cartas funcionaron como canales de circulación del conocimiento, permitiendo que la innovación se replicara en distintos lugares.

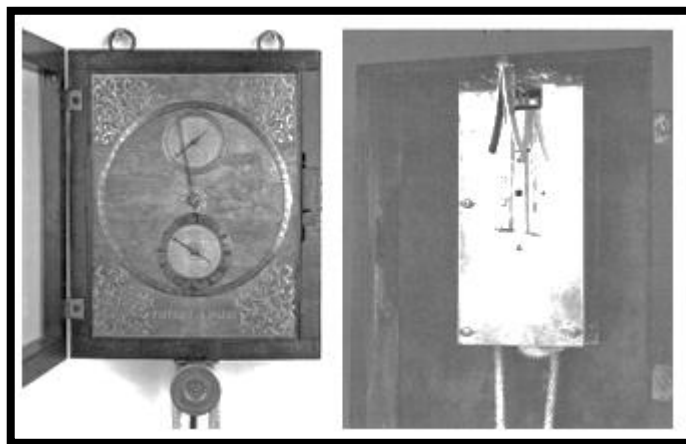


Imagen 8. Izquierda: El reloj de Isaac Thuret. Derecha: Las placas frontal y trasera del reloj de Isaac Thuret, Museo Boerhaave, Leiden, inventario n.º Vg854.

La conquista del reloj de péndulo, por tanto, no se debió únicamente a su valor técnico, sino también a la existencia de una comunidad científica activa y colaborativa que lo adoptó rápidamente. La relación del reloj de péndulo con la geometría refleja la concepción renacentista de representar la naturaleza en libros, escritos con lenguaje matemático. La regularidad del movimiento oscilatorio del péndulo confirmó que los fenómenos podían modelarse mediante ecuaciones. Este trasfondo matemático otorgó a la invención de Huygens un valor en el que la naturaleza podía ser traducida con representaciones e imágenes.

No obstante, la invención del reloj de péndulo no estuvo exenta de críticas y opciones de mejora pues pronto se encontró que la isocronía no era perfecta y que el periodo de

²⁵ En las recientes décadas, varios autores han publicado artículos sobre la invención del reloj de péndulo. La fuente más importante de estas publicaciones es la extensa obra estándar *Oeuvres Completes* de Christiaan Huygens publicada en 1888.

oscilación variaba ligeramente con la amplitud. Este límite no invalidó el instrumento, sino que estimuló nuevas modificaciones. En particular, Huygens desarrolló soluciones geométricas, como la fabricación de guías en forma de láminas “mejillas” cicloidales que forzarán al péndulo a describir trayectorias cicloidales tautócronas y corregir las desviaciones observadas. La innovación, lejos de resolver definitivamente el problema de la medición de la duración, abrió nuevas líneas de investigación que desembocaron en dispositivos de relojería modernos. La ciencia avanzó mediante invenciones que, al resolver problemas, generaban otros nuevos.

3.3. Componentes del reloj de péndulo

El mecanismo del reloj de péndulo consiste de un sistema en el que se integran cinco elementos fundamentales: 1) péndulo, 2) láminas “mejillas” cicloidales, 3) tren de engranes, 4) el mecanismo de escape y 5) el peso colgante. Estos componentes no pueden entenderse de manera aislada, porque conforman una estructura dinámica cuya función principal es mantener el péndulo en movimiento y, al mismo tiempo, traducir sus oscilaciones en intervalos regulares de duración construidos instrumentalmente.

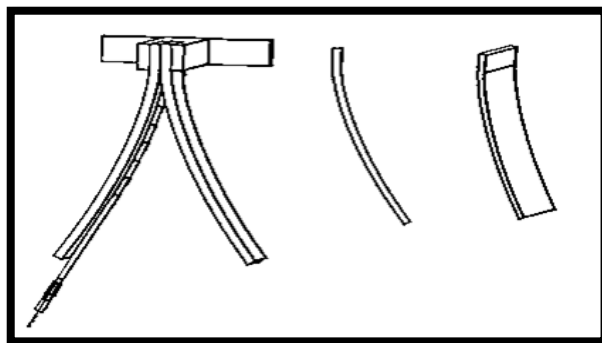


Imagen 9. Las láminas o “mejillas” cicloidales son uno de los aportes más ingeniosos y menos comprendidos del diseño de Christiaan Huygens, pues constituyen la solución geométrica y física que permitió transformar el péndulo común en el péndulo isócrona, fundamento del reloj de péndulo.

Imagen propia.

Las láminas “mejillas” cicloidales²⁶ (Imagen No. 9) y la rueda de escape tipo verja (Imagen No. 10) constituyen quizás la parte más ingeniosa del reloj de péndulo. El 01 de noviembre de 1658 Huygens escribe a Pierre Petit una carta comentándole:

Primero suspendí mi péndulo entre dos lamas curvas²⁷... que aprendí a moldear gracias a la experiencia... Y recuerdo haber ajustado tan bien dos relojes con este sistema, que en tres días no mostraron ni un segundo de diferencia, pese a que en ese mismo periodo cambié varias veces sus pesos, usando algunas veces unos más pesados y otras veces pesos más ligeros (Huygens, 1673/2005, p. 87).

Se trata de unas láminas con forma cicloidal que permiten al péndulo un movimiento isócrono, además el péndulo se conecta con un mecanismo de escape vertical que se enlaza al tren de engranes permitiendo que este reciba pequeños impulsos en cada oscilación para compensar la pérdida de energía debida a la fricción entre los componentes y/o la influencia del aire. Sin la rueda de escape, el péndulo se detendría al cabo de unos segundos; gracias a este mecanismo el movimiento se renueva continuamente, así mismo, el mecanismo de escape tiene la función de impedir que el peso colgante haga girar libremente las ruedas, liberando la energía de manera controlada en sincronía con las oscilaciones del péndulo. Es, por tanto, el punto de equilibrio entre libertad y restricción (Laesser, 2021), la condición indispensable para que el reloj de péndulo mantenga su regularidad.

²⁶ Para el 25 de diciembre de 1656 la adaptación de las láminas “mejillas” cicloidales para el isocronismo del péndulo, ya se había aplicado. Esta debe ser una fecha conmemorativa ya que esta solución práctica fue para el alivio al problema de la cuadratura del círculo que Huygens estudió.

²⁷ Huygens hace referencia con “*lamas curvas*” a las láminas “mejillas” cicloidales construidas por él.



Imagen 10. La rueda de escape tipo verja (también conocida como escape de paletas verticales con dientes tipo sierra) fue el primer mecanismo que transformó el movimiento continuo de las pesas o resortes en un movimiento intermitente y regulado, permitiendo que el reloj “tictaqueara”. Imagen propia.

El tren de engranes es el conjunto de ruedas dentadas que transmite el movimiento generado por el peso hasta las agujas indicadoras de la hora y los minutos del reloj de péndulo. Cada piñón o polea tiene como función aumentar o disminuir la velocidad de rotación del tren de engranes según sea necesario, de modo que las oscilaciones del péndulo se traduzca en vueltas completas de las agujas en la esfera de la caja frontal del reloj de péndulo. La geometría de los engranes, calculada con precisión garantiza que cada rueda transmita la fuerza sin excesiva fricción ni pérdida de energía. Este aspecto refleja la unión entre matemática y técnica que caracterizó cada relación entre piñones fundamentado en proporciones numéricas precisas, lo que demuestra cómo la ciencia se integró con los dominios del arte relojero.

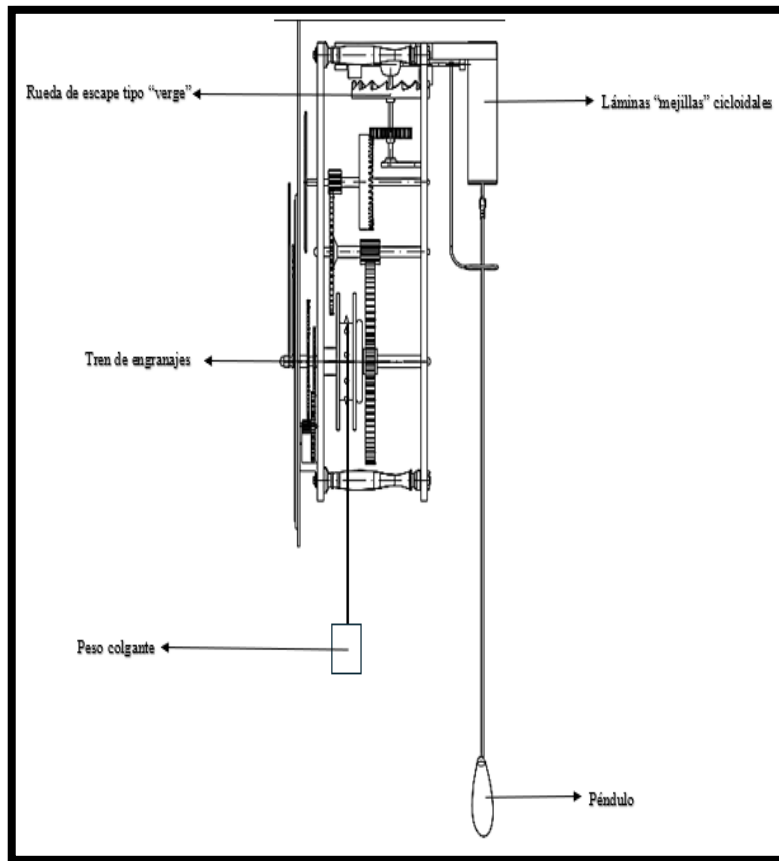


Imagen 11. Vista lateral izquierda del reloj de péndulo y sus componentes. Imagen tomada de *HO*.

El peso colgante (Imagen No. 11) es el "motor" primario del reloj de péndulo. Colgado de una cuerda que se enrolla en una polea tipo tambor, ejerce una fuerza constante que se transmite al tren de engranes. Su ventaja frente a otros sistemas, como el de resortes, radica en que ofreció una tensión más estable a lo largo de la caída. Al descender, el peso alimenta todo el mecanismo, pero lo hace bajo el control de la rueda de escape tipo verja y del péndulo, evitando que la energía se libere sin restricción. En este sentido, el peso representa la fuente de energía continua, mientras que el péndulo representa la regularidad natural, asimismo las láminas ciclooidales y el mecanismo de escape, la mediación que armoniza ambos elementos.

La interacción entre estos elementos es el resultado de décadas de experimentación con relojes mecánicos previos al reloj de péndulo. Los artesanos del renacimiento ya habían desarrollado trenes de engranes sofisticados, pero carecían de un regulador confiable. Los

primeros mecanismos de escape, como el de paletas o el de corona, eran demasiado irregulares y transmitían impulsos desiguales al volante foliot (balancín). El aporte de Huygens consistió en integrar el péndulo como oscilador regular y adaptar un escape que pudiera acompañar su ritmo. De esta manera, la tradición medieval de la relojería alcanzó un nivel de precisión científica superior. Este ensamble ofreció una representación mecánica de la dimensión temporal. El reloj se convirtió, así, en instrumento de medición, reflejando tanto la regularidad del cosmos como la capacidad humana de medir la duración de los fenómenos con precisión.

En términos históricos, el diseño de las láminas “mejillas” cicloidales y el mecanismo de escape fue objeto de múltiples refinamientos. El llamado escape de áncora, desarrollado a finales del siglo XVII, inventado por William Clement y popularizado alrededor de 1680, permitió reducir las perturbaciones que el impulso transmitido generaba sobre el péndulo. Gracias a esta innovación, la oscilación se aproximaba más a la isocronía teórica, mejorando la precisión del reloj de péndulo. Estos refinamientos técnicos muestran que el mecanismo no quedó concluido con Huygens, sino que comenzó una tradición de investigación mecánica que se extendió durante los siglos XVIII y XIX. Cada mejora respondía a la tensión constante entre teoría y práctica. La importancia del peso en el mecanismo también debe ser resaltada. Aunque en siglos posteriores los relojes de resorte se popularizaron por su portabilidad, los relojes de peso mantuvieron siempre una ventaja en términos de estabilidad. El peso, al ejercer una fuerza constante bajo la acción de la aceleración gravitacional terrestre, representó una fuente energética confiable. Este principio se convirtió en una garantía de precisión en los relojes de péndulo utilizados en observatorios astronómicos y laboratorios científicos, donde contar cada segundo se hacía una necesidad práctica.

El mecanismo del reloj de péndulo también tuvo un aporte académico. Los manuales de relojería y las ilustraciones técnicas del siglo XVII y XVIII describen detalladamente el tren de engranes, mostrando a aprendices de relojería cada componente y funcionamiento del instrumento. De este modo, el reloj no solo fue un instrumento de medición, sino también un recurso que permitía la comprensión de nociones sobre geometría, mecánica y física aplicada. Para los experimentadores reproducir un modelo de este mecanismo es una vía a

la comprensión de la relación entre los principios de la dinámica y la materialidad de los instrumentos. El mecanismo del reloj de péndulo es un objeto de conocimiento; el tren de engranes, las láminas “mejillas” cicloidales, el mecanismo de escape, el péndulo y el peso conforman un sistema en el que convergen regularidad natural, precisión técnica y comprensión cognitiva.

3.4. Funcionamiento del reloj de péndulo

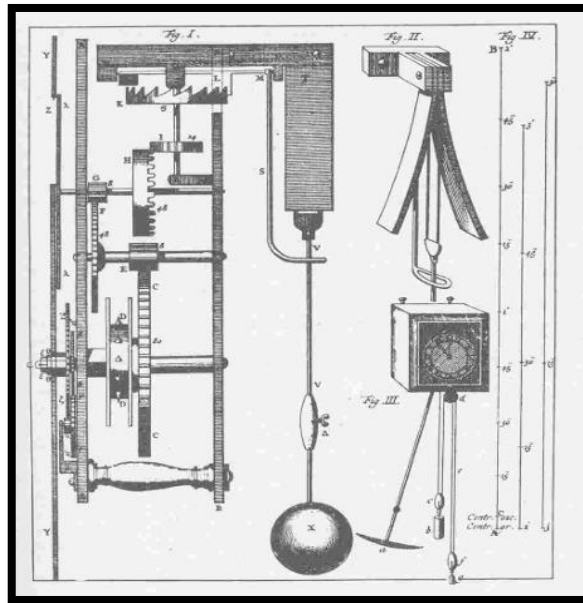


Imagen 12. Extraída del documento *HO*, muestra el aspecto del reloj de péndulo diseñado por Huygens. Imagen tomada de *HO*.

En el reloj que se muestra en la imagen (Imagen No. 12) cada pieza cumple una función precisa dentro del mecanismo, articulando el movimiento pendular con el tren de engranes, las láminas cicloidales, el mecanismo de escape y el peso colgante. La figura publicada en el *HO* muestra la disposición técnica que transformó la oscilación del péndulo en un patrón operativo de duración. Las tres figuras (imagen No. 12) ilustran la transmisión del movimiento (fig. I), el sistema de regulación (fig. II) y el suministro energético (fig. III), ofreciendo una comprensión técnica del reloj de péndulo como dispositivo capaz de generar regularidad temporal en la actividad experimental.

A continuación, una descripción con base en la imagen No. 13, que permite detallar los componentes del reloj de péndulo de la figura I, diseñada por Huygens.

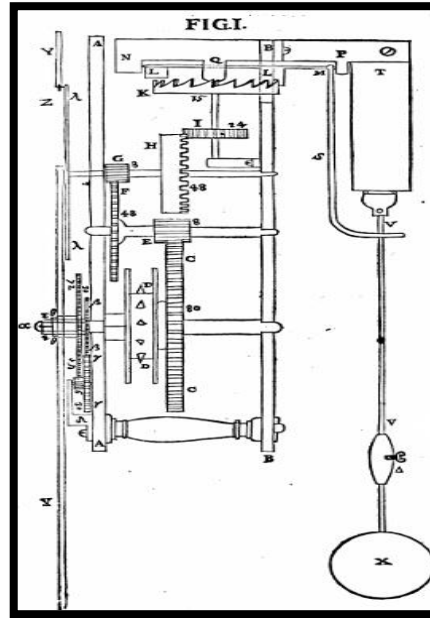


Imagen 13. Dibujo de perfil lateral izquierdo de los componentes del reloj de péndulo. Imagen tomada de *HO*.

AA y *BB* son dos soportes paralelos cuyos bordes están unidos por 4 bases estructurantes. Los ejes de los piñones están insertados en dichos soportes, sobresaliendo entre las caras internas. El piñón principal *C*, se compone de 80 dientes y su eje se engrana al piñón *D* más pequeño que sostiene una cuerda atada en su extremo con una pesa colgante. Así, el piñón *C* gira a causa de las pesas influenciadas por la aceleración gravitacional, haciendo girar al piñón *E*, compuesto por 8 dientes, contiguo al piñón *F* que está ubicado en ese mismo eje, y que se compone de 48 dientes. El piñón *F* se relaciona con los piñones *G* y *H*, compuestos por 8 y 48 dientes respectivamente. Los dientes del piñón *H* mueven al piñón *I* junto con el piñón *K* también llamado rueda de escape tipo verja, ubicado en el mismo eje perpendicular al anterior. El piñón *I* consta de 24 dientes y la rueda de escape tipo verja se compone de 15 dientes, y tiene forma de sierra. Sobre el eje de la rueda *K*, se ubica un eje horizontal, que se representa por *LM*, que posee paletas que sobresalen sosteniendo los soportes *NQ* y *P*, que se encuentran fijos y unidos al soporte *BB*. Cabe anotar que los soportes

NQ y Q se extienden hacia abajo, estos dos soportes tienen una ranura circular por la que pasa el eje LM , sostenido, además, con el soporte S , y unido a la línea del péndulo V , que se relaciona directamente con los piñones K e I .

El eje LM se intercepta por el soporte vertical BB y la paleta P , para permitir el movimiento libre del soporte S del péndulo. Este eje LM debe tener la longitud pertinente para que la varilla S se pueda fijar a él y ésta pueda girar. Este movimiento es oscilatorio, primero en una dirección y luego en la otra, debido a que los dientes de la rueda de escape tipo verja K son en forma de sierra, y van golpeando “tictac” las paletas LL , como se puede apreciar en la imagen No. 13. El soporte S , está doblado a 90° en su parte inferior, este extremo a su vez posee una ranura que rodea el péndulo V , en donde la péndola X está fija. La vara V del péndulo se suspende desde el soporte superior con una doble cuerda entre 2 finas láminas “mejillas” cicloidales, de las cuales solo T es visible en el dibujo. En el mismo dibujo elaborado por Huygens se muestra una figura adyacente que en el dibujo original es catalogada como Figura II (Imagen No. 14) en la que se presenta la forma cicloidal de cada lámina “mejilla” y la forma de suspensión del péndulo.

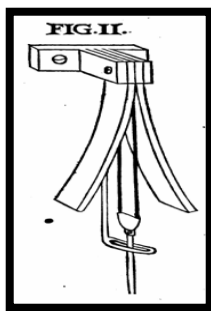


Imagen 14. Dibujo de las láminas “mejillas” cicloidales del reloj de péndulo de Huygens. Imagen tomada de *HO*.

Además, Huygens presenta, en las siguientes páginas continuas al dibujo de la imagen No. 12, las dimensiones que debe poseer el péndulo para que logre medir la duración de un segundo, para lo que Huygens se inventó el “hour foot”. Huygens indica que el péndulo debe tener 3 “pies horarios”, basado en la relación $881/864$ respecto a la referencia de medida del pie en París en el siglo XVII (aprox. 32,5 [cm]). Entonces Huygens propuso que

la longitud del péndulo debe ser de aproximadamente 99,42 [cm]. También Huygens escribe sobre la técnica utilizada para trazar una curva cicloide, el sistema de pesos que impulsan el movimiento del mecanismo del reloj, y cómo ajustar el reloj en función de las condiciones atmosféricas, ambientales e incluso de los días del año, presentando una tabla organizada con información relacionada al movimiento oscilatorio del reloj de péndulo para cada día. Es importante resaltar que Huygens también presenta su propuesta de reloj marino para solucionar el problema técnico que más inquietaba a los estudiosos de la época: medir longitudes en el mar. A continuación, detalles de cada ilustración de la imagen No. 12: En la primera figura se muestra una vista lateral del reloj, una representación completa del mecanismo en donde se observa el bastidor, el tren de engranes, las láminas “mejillas” cicloidales y el péndulo. analicemos detalladamente el dibujo:

Tabla 1. Vista lateral del reloj de péndulo de Huygens con sus respectivos componentes (Ilustración I).

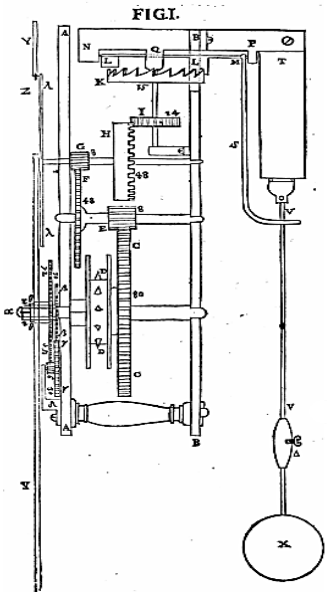
Imagen Ilustración I	Elemento o Componente	Descripción y función
	Láminas <i>AA</i> y <i>BB</i>	Placas paralelas de soporte en donde se hace el montaje de los piñones y/o poleas.
	Piñón <i>C</i>	Rueda motriz de 80 dientes, impulsada por el sistema de pesos. Piñón que da inicio al tren de engranes.
	Polea <i>D</i>	Polea tipo tambor que contiene la cuerda enrollada que sostiene el sistema de pesos.
	Piñones <i>E, F, G, H, I, K</i>	Ruedas intermedias que transmiten el movimiento del piñón principal (Piñón <i>C</i>) hasta el mecanismo de escape <i>K</i> . Ruedas de 48, 8, 8, 48, 24 y 15 dientes respectivamente.
	Mecanismo de escape-péndulo <i>LM</i>	Mecanismo de escape que alterna contacto con el piñón <i>K</i> regulando el avance de un diente por oscilación doble del péndulo.
	Soporte <i>NQ</i> y <i>P</i>	Soportes de eje que sostienen el mecanismo de escape-péndulo <i>LM</i> . Se observa que <i>N</i> incluye una guía con forma de ranura.
	Ranura <i>Q</i>	Permite que el eje del mecanismo de escape-péndulo <i>LM</i> oscile con libertad guiada.
	Péndulo <i>XV</i>	Cuerpo oscilante. Controla la frecuencia del “tic-tac”. Su longitud define la duración del segundo.

Tabla 2. Detalle de la suspensión cicloidal (Ilustración II).


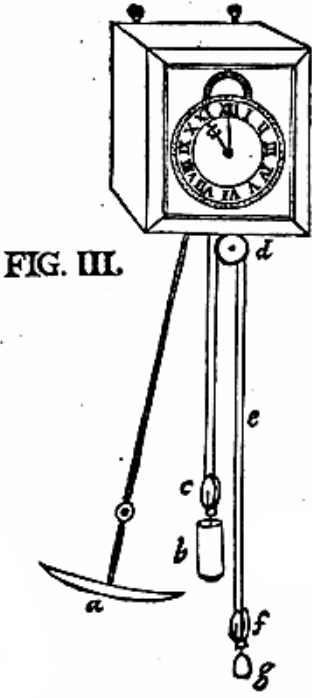
Imagen Ilustración II	Elemento o Componente	Descripción y función
	Detalle de la suspensión cicloidal	Muestra la forma particular de las láminas curvas utilizadas para que el péndulo oscile siguiendo la trayectoria de una cicloide.
	Láminas “mejillas” cicloidales	Guías metálicas curvas que aseguran que el péndulo describe un arco cicloidal isócrono (de igual duración sin importar su amplitud).
	Punto de suspensión	El hilo del péndulo pasa entre las láminas, y la forma determina la corrección geométrica para la isocronía.
	Función general	Evitar el error en las oscilaciones amplias que no siguen una trayectoria isócrona.

Tabla 3. Vista frontal de la caja del reloj de péndulo. (Ilustración III).

Imagen Ilustración III	Elemento o Componente	Descripción y función
	Vista frontal de la caja del reloj de péndulo	Muestra la posición del péndulo y los indicadores en la carátula del reloj.
	Caja frontal del reloj	Contiene indicadores de horas y minutos. Los segundos son indicados mediante una oscilación del péndulo.
	Sistema de Pesos y poleas	Mecanismo que mantiene el funcionamiento continuo del reloj mediante tracción constante a causa de la influencia de la aceleración gravitacional en el peso colgante.
	Péndola <i>a</i>	Cuerpo oscilante. Controla la frecuencia del “tic-tac”. Su longitud define la duración del segundo.
	Peso principal (masa <i>b</i>)	Proporciona la fuerza motriz inicial para sostener el funcionamiento del sistema.
	Poleas <i>c</i> y <i>f</i>	Redirigen la cuerda conectada al peso para permitir tracción uniforme.
	Contrapeso menor <i>g</i>	Ayuda a mantener la tensión en el sistema para evitar tirones bruscos.
	Cuerda <i>e</i>	Conecta todas las poleas y pesos. Diseñada para mantener una tensión constante incluso cuando se vuelve a enrollar el peso motriz.

3.5. Geometría del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide, evoluta, tautocronía e isocronía.

El estudio geométrico del movimiento oscilatorio del péndulo muestra cómo la trayectoria del péndulo podía ser controlada para alcanzar una isocronía pertinente y así realizar las mediciones deseadas; es decir, lograr que todas las oscilaciones del péndulo tuvieran la misma duración, independientemente de la amplitud de este. El problema, aparentemente técnico, se convirtió en una de las primeras aplicaciones de la geometría en la solución de un problema físico.

La aplicación del movimiento oscilatorio isócrono del péndulo para la medición de la duración de un fenómeno se atribuye a Galileo Galilei. Este hallazgo fue paradigmático, pues sugería que el movimiento oscilatorio del péndulo podía servir como instrumento de medición patrón para comparar la duración de otros fenómenos. Sin embargo, la isocronía observada por Galileo era sólo una aproximación sin demostración²⁸. En los textos escritos por Galileo se describen fórmulas matemáticas aproximadas y con estas, el diseño de un reloj de péndulo, que nunca se materializó. El ingenio de Galileo para diseñar recursos e instrumentos científicos abrió las posibilidades para las prácticas experimentales del siglo XVII, en donde la necesidad de precisión en la medición de la duración permitiría nuevos descubrimientos desde la técnica relojera, la navegación marítima y la astronomía.

Luego de esta contextualización superficial sobre los orígenes tempranos de la aplicación del movimiento oscilatorio del péndulo en un reloj, y con base en el estudio detallado sobre el diseño y construcción del reloj de péndulo, se hace necesario conocer ¿qué elementos de la geometría y la matemática se relacionan con el diseño y construcción del reloj de péndulo de Huygens? y para responder a esta cuestión es pertinente realizar un recorrido por las propiedades de la cicloide, así como lo hace Huygens en el *HO*. Nos serviremos de imágenes diseñadas por el autor de la presente propuesta, con las que se

²⁸ Europa creía que el péndulo de Galileo era *isócrono* (o *tautócrono*), una panacea buscada; pero primero Galileo y luego Godfrey Wendelin en 1643, observaron que no lo era.

analizan problemas históricos de la geometría, en este caso particular, la geometría implícita en la mecánica del reloj de péndulo. Además, estas imágenes permitirán representar las relaciones geométricas entre los distintos componentes del mecanismo para comprender su funcionamiento. Con cada figura se incluye un análisis acompañado de comentarios elaborados a partir de lo escrito por Huygens en el *HO.*. Empecemos definiendo algunas palabras clave como isócrono, cicloide, evoluta de la cicloide, tautocronía de la cicloide, entre otras.

La isocronía es una palabra con raíces griegas, se compone de dos palabras: *isos* que significa igual, y *chronos* que significa tiempo, y a las que se añade el sufijo -ismo. El término isocronismo significa la misma duración en los movimientos oscilatorios de un cuerpo o que ese cuerpo moviéndose posee la característica de que la duración de sus periodos son proporcionales y similares. Este concepto de isocronía o isocronismo fue fundamental en los estudios desarrollados por Galileo, quien hipotetizó que el isocronismo sólo se presentaba en el movimiento oscilatorio del péndulo cuando este oscilaba a menos de 15° respecto a la perpendicular del eje de la amplitud de la oscilación.

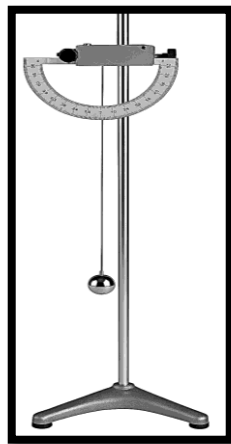


Imagen 15. Representación de montaje experimental para analizar el isocronismo del péndulo. El montaje consta de un péndulo, un transportador, un soporte metálico. Imagen propia.

El concepto de isocronía se presentó en los estudios sobre el movimiento oscilatorio realizado por Galileo Galilei, permitiendo establecer que el período de oscilación de un péndulo permanece prácticamente constante solo cuando la oscilación se mantiene dentro de

ángulos pequeños, menores a 15° respecto a la vertical. A partir de esta observación, Galileo concluyó que el isocronismo no era una propiedad absoluta del péndulo, sino una condición restringida por la geometría de su movimiento.

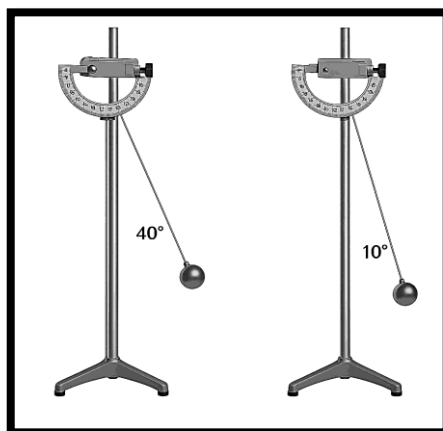


Imagen 16. Izquierda: Péndulo NO Isocrónico, oscilación con amplitud mayor a 15° . Derecha: Péndulo Isocrónico, oscilación con amplitud menor a 15° . Imagen propia.

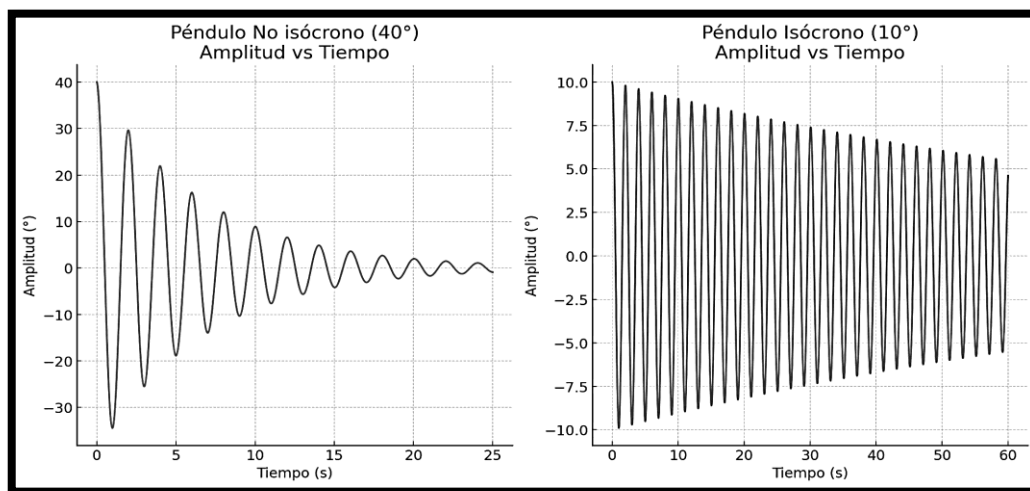


Imagen 17. Las gráficas muestran las amplitudes de la oscilación con base en el concepto de isocronismo para el péndulo simple. Izquierda: representación gráfica de las oscilaciones del péndulo no isócrono. Derecha: representación gráfica de las oscilaciones del péndulo isócrono. Ilustración realizada con fines didácticos. Imagen propia.

Con el propósito de aproximarnos a la hipótesis Galileana según la cual un péndulo que oscila con una amplitud menor a 15° mantiene un movimiento isócrono — es decir, que

su periodo no depende de la amplitud del desplazamiento —, se diseñó una práctica de laboratorio orientada a medir la duración de la oscilación para diferentes ángulos iniciales. El objetivo principal consistió en determinar si el ángulo de amplitud influye significativamente en la duración del periodo, comparando los valores experimentales con los resultados teóricos previstos por la ecuación del péndulo simple.

Para ello, se utilizó un péndulo de longitud fija de 38 [cm], una masa puntual de 10 [g] suspendida mediante un hilo inextensible y ligero, y un transportador angular que permitió establecer amplitudes iniciales de 10°, 20°, 30°, 40° y 50° (Imagen No. 15). Se registró la duración empleada por el péndulo para completar diez oscilaciones completas para cada ángulo, repitiendo la medición tres veces con el fin de minimizar errores aleatorios y obtener un valor promedio representativo. Los resultados promedios fueron:

Tabla 4. Resultados experimentales del movimiento pendular.

Amplitud [°]	Momento 1 [s]	Momento 2 [s]	Momento 3 [s]	Promedio 10 oscilaciones [s]	Duración cada oscilación [s]
10°	12,15	12,17	12,18	12,17	1,217
20°	12,20	12,25	12,23	12,23	1,223
30°	13,48	13,30	13,25	13,34	1,334
40°	13,49	13,55	13,60	13,55	1,355
50°	13,52	13,60	13,70	13,61	1,361

Con el fin de comparar estos valores con el modelo teórico, se calculó el periodo ideal del péndulo simple mediante la expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{38 \text{ [cm]}}{982 \text{ [cm/s}^2\text{]}}} = 1,2359 \text{ [s]}$$

Donde $L = 38 \text{ [cm]}$ y $g = 982 \text{ [cm/s}^2\text{]}$. Al sustituir los valores y realizar los cálculos, se obtuvo un periodo teórico $T = 1,2359 \text{ [s]}$ por oscilación (equivalente a 12,359 [s] para diez oscilaciones). Este valor fue tomado como referencia para determinar qué mediciones experimentales se aproximan más al comportamiento ideal del péndulo isócrono. Al analizar los datos, se evidenció que para ángulos de 10° y 20° presentan duraciones

promedio aproximadas de oscilación cercanos al valor teórico, con desviaciones menores al 2%. En cambio, en las amplitudes de 30°, 40° y 50°, las diferencias se incrementaron, lo que sugiere la pérdida de isocronismo debido al aumento de la componente tangencial de la fuerza restauradora y la consiguiente desviación del movimiento armónico simple.

Tabla 5. Análisis comparativo con el valor teórico.

Amplitud [°]	Duración cada oscilación [s]	Periodo teórico [s]	Diferencia absoluta [s]	Error porcentual [%]
10°	1,217	1,2359	0,0189	01,53
20°	1,223	1,2359	0,0129	01,04
30°	1,334	1,2359	0,0984	07,96
40°	1,355	1,2359	0,1191	09,64
50°	1,361	1,2359	0,1251	10,12

Estos resultados se ponen en relación con la hipótesis de Galileo: el movimiento pendular puede considerarse isócrono únicamente para pequeñas amplitudes. A medida que el ángulo inicial se incrementa, el periodo deja de ser constante, evidenciando que la aproximación de $\sin \theta \approx \theta$ — base del modelo del péndulo simple — pierde precisión. Este comportamiento abre la reflexión epistemológica sobre cómo las idealizaciones teóricas, al ser contrastadas empíricamente, permiten comprender los alcances y restricciones del conocimiento físico.

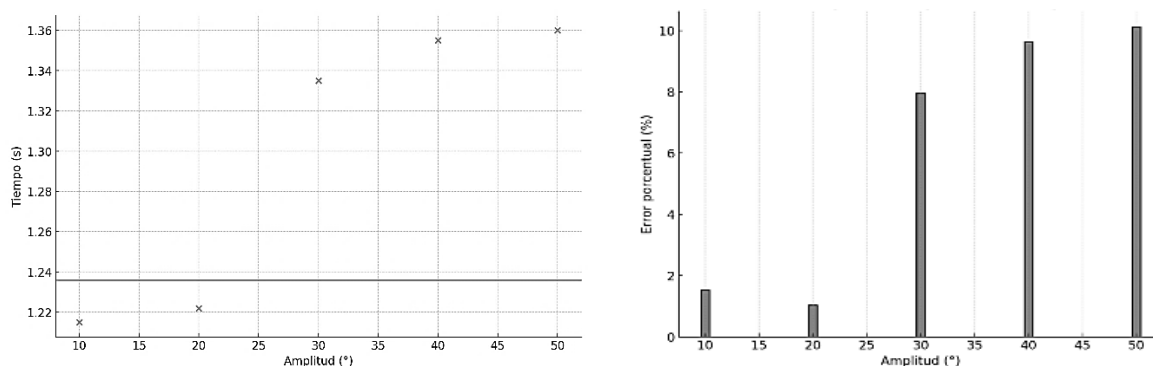


Imagen 18. Izquierda: Muestra la duración experimental de cada oscilación frente al periodo teórico (1,2359 [s]). Se observa que para pequeñas amplitudes (10° y 20°) la duración es muy cercana al valor teórico (línea gruesa), lo que indica isocronía aproximada. Sin embargo, a partir de los 30°, el periodo experimental aumenta, mostrando dependencia del periodo con la amplitud, característica del movimiento no isócrono. Derecha: Representa el error porcentual en función de la amplitud. Se evidencia un incremento del error a medida que crece la amplitud, alcanzando valores superiores al 10 % para 50°. Este comportamiento confirma que el modelo teórico del péndulo simple — que asume pequeñas oscilaciones — pierde validez para grandes ángulos, debido a la aproximación $\sin(\theta) \approx \theta$. Imágenes propia.

Esta práctica experimental permitió un acercamiento a la idea de que la isocronía del péndulo, los resultados muestran una concordancia estrecha entre la hipótesis Galileana y las mediciones experimentales para amplitudes entre $15^\circ \pm 5^\circ$, mientras que las desviaciones observadas para mayores amplitudes confirman la dependencia del periodo respecto del ángulo. Esta experiencia ilustra el modo en que la observación y la medición rigurosa constituyen herramientas esenciales para la construcción y validación del conocimiento científico.

Varias décadas después de los estudios de Galileo sobre el isocronismo, Huygens se propuso formalizar y superar las limitaciones del hallazgo de Galileo. Con la construcción del primer reloj de péndulo operativo, logró una precisión notable para la época, no obstante, rápidamente descubrió que el péndulo simple no era perfectamente isócrono, pues el período dependía de la amplitud del arco. La solución a este problema implicó la búsqueda de una trayectoria alternativa al arco circular (Imagen No. 19). Así, Huygens orientó sus investigaciones hacia el estudio de curvas especiales que pudieran garantizar un movimiento estrictamente isócrono. La atención recayó en la cicloide (Imagen No. 20), curva estudiada

inicialmente en el renacimiento por Galileo y Mersenne, pero cuya aplicación práctica se consolidó gracias a Huygens.

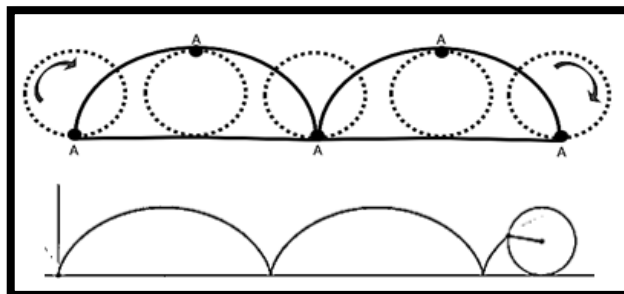


Imagen 19. La cicloide es una curva generada por un punto de una circunferencia que rueda sin deslizarse sobre una línea recta. Imagen propia.

Aunque su descripción puede parecer simple, sus propiedades geométricas y mecánicas son extraordinarias. Roberval y Pascal habían estudiado previamente su longitud y área, pero fue Huygens quien reconoció en ella una solución al problema del isocronismo (Moscovici, 1967). Descubrió que el movimiento de un cuerpo deslizándose por una cicloide invertida es tautócrono, es decir, el tiempo de llegada al punto más bajo es invariable sin importar la altura inicial. Este hallazgo no sólo resolvía el problema planteado por Galileo, sino que elevaba a la cicloide a una de las curvas paradigmáticas del siglo XVII, junto con la parábola y la elipse de Kepler (Jespersen, 1982).

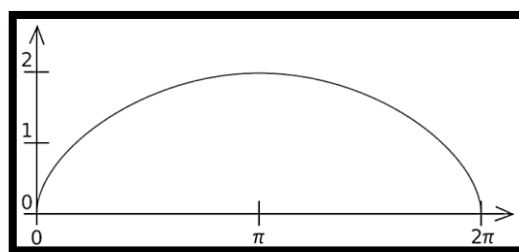


Imagen 20. Curva cicloide generada por la rotación de 0 a 2π de una circunferencia sobre una línea recta. Este intervalo representa una vuelta completa de la circunferencia. Imagen propia.

Esta solución que Huygens da al problema de la cicloide, usando métodos geométricos con rasgos del cálculo diferencial, que para la época aún no había sido formalizado por Newton ni Leibniz, permitió la determinación de los arcos de la cicloide, la evoluta de la curva cicloide, el uso de puntos de tangencia y centros de curvatura (Imagen

No. 21), y la relación entre la cicloide como curva tautócrona (mismo tiempo de caída) e isócrona (mismo tiempo de oscilación). Esto constituye un ejemplo temprano de la geometría diferencial aplicada. Huygens escribe sobre la evoluta:

La curva evoluta de una cicloide es otra cicloide del mismo tipo... Por tanto, si el péndulo se suspende entre dos cicloides de este tipo, el punto del peso describirá una trayectoria isócrona. (Huygens, 1673/2005, p. 102).

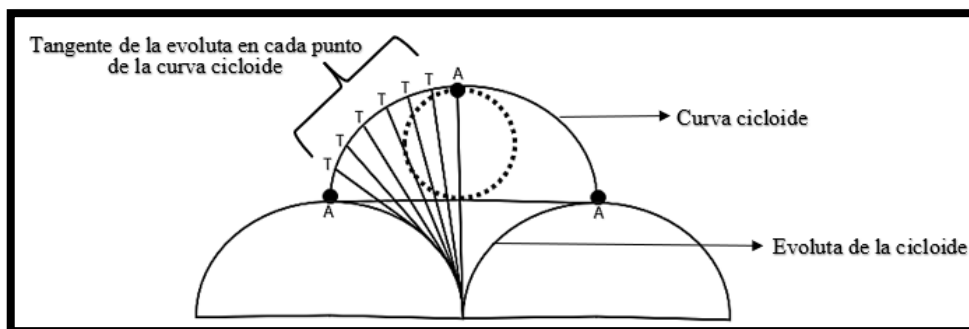


Imagen 21. La imagen muestra la relación geométrica entre la cicloide y su evoluta, indicando que en cada punto de la cicloide las líneas tangentes T son perpendiculares a la evoluta correspondiente. El punto A representa la posición de una péndula que se desplaza siguiendo una trayectoria cicloidial.
Imagen propia.

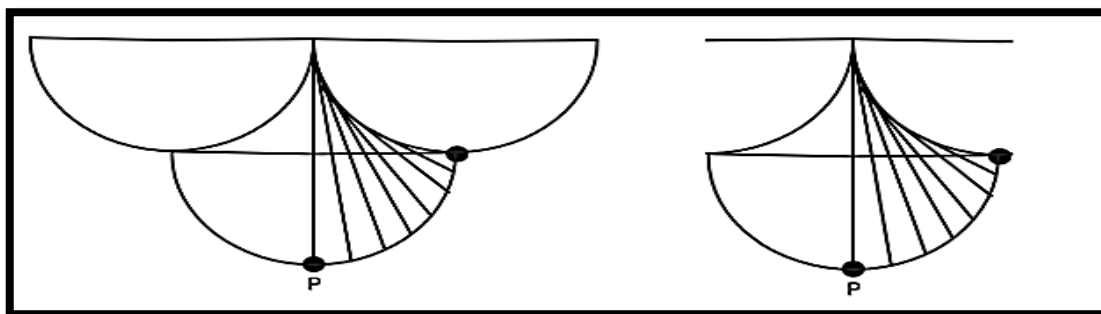


Imagen 22. La imagen muestra el movimiento de un péndulo P que oscila describiendo una trayectoria cicloidial delimitada por dos arcos simétricos denominados láminas "mejillas" cicloides. Las líneas rectas que parten del punto superior hacia la péndula representan distintas posiciones del hilo durante la oscilación, indicando cómo su longitud efectiva varía al enrollarse sobre las mejillas cicloides. Imagen propia.

Un aspecto fundamental en la geometría de la cicloide es su evoluta, es decir, la curva que describe el centro de curvatura de cada uno de sus puntos. Huygens demostró que la evoluta de una cicloide es otra cicloide congruente. Este resultado permitió diseñar

dispositivos que transformaron la trayectoria circular del péndulo en un movimiento cicloidal. La imagen No. 22 ilustra este proceso: al construir placas metálicas con la forma de la evoluta de la cicloide, se logra que el hilo del péndulo se enrolle y desenrolle siguiendo tangentes que obligan a la péndola a recorrer un arco cicloidal. La semejanza entre cicloide y evoluta fue clave para materializar un reloj de péndulo verdaderamente isócrona.

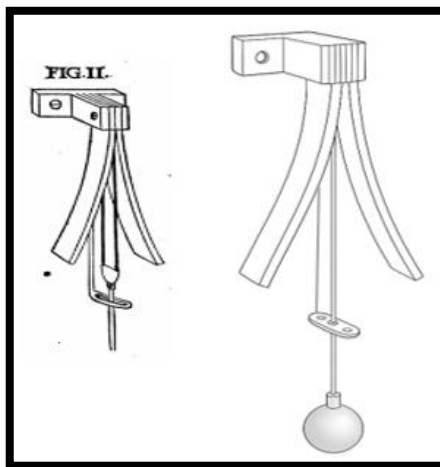


Imagen 23. La imagen presenta el diseño del péndulo isócrona de Huygens, en el que la péndola oscila guiada por dos láminas “mejillas” cicloidales simétricas. Estas láminas controlan el enrollamiento y desenrollamiento del hilo durante la oscilación, modificando su longitud efectiva y obligando a la masa a seguir una trayectoria cicloidal. Gracias a este mecanismo, el movimiento del péndulo mantiene un período constante sin importar la amplitud, garantizando así la isocronía necesaria para la precisión en la medición del tiempo en los relojes del siglo XVII. Imagen tomada de *HO*.

Para lograr un sistema isócrona, Huygens diseñó láminas “mejillas” cicloidales metálicas con forma de arco de cicloide invertida que guiaba la cuerda del péndulo. La Imagen No. 23 ha sido tomada del tratado *HO*, en donde la trayectoria descrita por el punto de oscilación (masa del péndulo), describe un movimiento influenciado por la cicloide. La construcción de las láminas “mejillas” cicloidales constituyó un avance técnico decisivo. Huygens propuso ubicar dos placas metálicas con la forma de la evoluta de la cicloide a cada lado del péndulo.

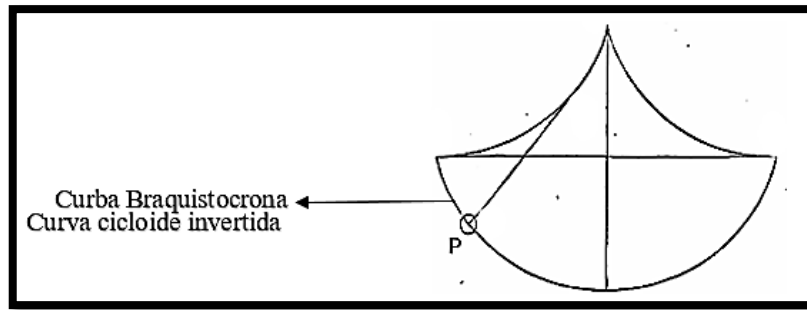


Imagen 24. La imagen muestra la curva braquistócrona, que corresponde a una cicloide invertida, destacando el punto P como posición inicial de un cuerpo que se desliza sobre ella. Imagen tomada de *HO*.

Además, el principio de tautocronía ha sido la piedra angular de este desarrollo técnico. Una curva tautócrona es aquella en la que un objeto tarda siempre la misma duración en descender hasta su punto más bajo, sin importar desde qué altura se suelte. Huygens demostró que la única curva tautócrona es la cicloide invertida. La genialidad de Huygens consistió en trasladar esta propiedad a la construcción de relojes, logrando que el período de oscilación del péndulo no dependiera de la amplitud. La tautocronía de la cicloide resolvía así el sueño de Galileo: un oscilador perfectamente isócrono para medir el tiempo (Imagen No. 24).

Desde un punto de vista geométrico, la demostración de la tautocronía se apoya en la conservación de la energía y en la relación entre el arco de la cicloide y la distancia recorrida verticalmente. En términos modernos, se puede expresar como un problema de cálculo de la duración de descenso a causa de la aceleración gravitacional terrestre. Mientras que en una trayectoria circular el tiempo depende del ángulo inicial, en la cicloide se omite esta dependencia. Esto se traduce en una ecuación diferencial cuyo período resulta ser constante. Aunque Huygens no disponía del formalismo completo del cálculo, su razonamiento geométrico fue confirmado posteriormente por matemáticos como Johann Bernoulli, quien lo integró en el famoso problema de la curva braquistócrona (Burton, 1992).

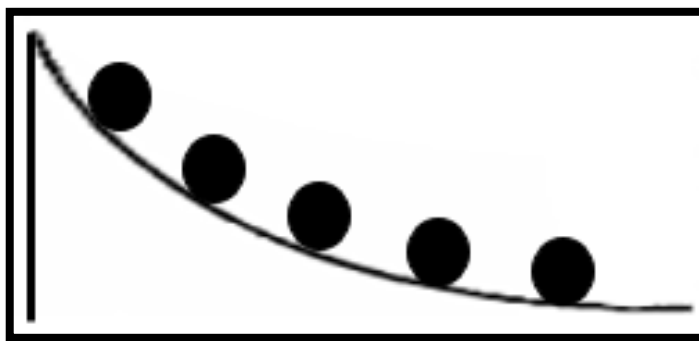


Imagen 25. La imagen representa una curva braquistócrona — una cicloide invertida — sobre la cual varias esferas descienden desde diferentes posiciones iniciales. Independientemente del punto de partida, todas las esferas llegan al punto más bajo al mismo tiempo. Imagen propia.

Por otro lado, la braquistocronía, formulada por Johann Bernoulli en 1696, corresponde a una solución para determinar la curva sobre la cual un cuerpo, sometido únicamente a la aceleración gravitacional, tarda el menor tiempo posible en descender de un punto a otro (Imagen No. 25). Sorprendentemente, la solución resultó ser la misma cicloide. Así, mientras la tautocronía resalta la igualdad de la duración de los descensos sin importar la posición inicial, la braquistocronía destaca la mínima duración absoluta del trayecto. Ambas propiedades revelan la centralidad de la cicloide como curva que conecta la geometría con principios mecánicos fundamentales, consolidándose como un puente entre la geometría analítica y la mecánica clásica.

El diseño geométrico del reloj de péndulo de Huygens mostró que un problema físico podía resolverse mediante la geometría de una curva. En este caso, la abstracción matemática de la cicloide se materializó en un mecanismo capaz de regular con precisión la medición de la duración de un segundo mediante oscilaciones. Uno de los avances más significativos en la historia del reloj de péndulo fue la innovación denominada “*péndulo segundo*” o “*péndulo real*”²⁹, cuya longitud se estableció en aproximadamente 0,994 [metros]. Este diseño permitía que cada oscilación completa tuviese una duración de dos segundos, es decir, un segundo por semioscilación, lo que facilitaba directamente el fraccionamiento de un

²⁹ Este reloj podía funcionar durante aproximadamente tres horas, con un error de tan sólo un segundo. El reloj real de *Huygens* utilizaba una rueda de escape tipo verja tradicional, accionado por una pesa que caía cinco centímetros por hora.

minuto en unidades iguales y medibles. El “*péndulo segundo*” o “*péndulo real*” representó refinamiento técnico y formalización conceptual: la posibilidad de vincular la unidad de medida (el segundo) con una longitud física determinada. En este sentido, se convirtió en un puente entre la instrumentación y la metrología, anticipando la necesidad de establecer patrones universales de medida que trascendieran los sistemas locales o arbitrarios. La introducción de este péndulo, alrededor de 1670, permitió además que los relojes contaran con agujas de minutos y posteriormente de segundos, (Imagen No. 26) ampliando el horizonte de precisión y transformando la vida cotidiana, la navegación marítima y las prácticas experimentales.

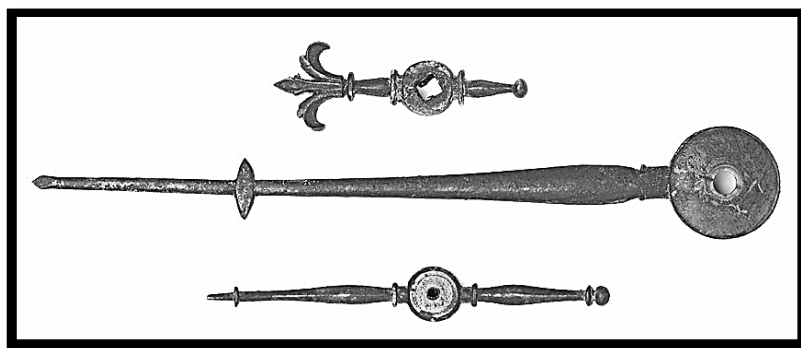


Imagen 26. Agujas originales del reloj de Thuret descubierto por Jean-Claude Sabrier. Imagen tomada de “*Identificación y atribución del primer reloj de péndulo de Christiaan Huygens*”, en donde Jean-Claude Sabrier presenta fotografías de un reloj de péndulo del siglo XVII.

Desde un punto de vista técnico, la precisión del “*péndulo segundo*” o “*péndulo real*” se sustentó con base en dos factores esenciales: la reducción de la amplitud de oscilación gracias al mecanismo de escape tipo áncora (imagen No. 27) y la definición de una longitud estándar que podía reproducirse en distintos relojes. Sin embargo, también revelaba las limitaciones inherentes a las condiciones físicas locales, ya que la duración del segundo depende de la aceleración de la gravedad en cada región geográfica. Esta relación puso de manifiesto la necesidad de correcciones y adaptaciones según la latitud o la altitud, un aspecto que conectaba el refinamiento del reloj con el desarrollo posterior de la geodesia. El “*péndulo segundo*” o “*péndulo real*”, por tanto, no fue únicamente un aparato técnico: constituyó una manera de consolidar la idea de que la duración podía ser medida y regulada

mediante un fenómeno físico reproducible, vinculando a la práctica relojera con la formulación científica de estándares trazables.

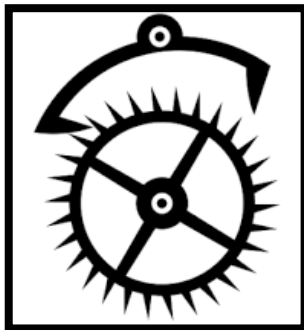


Imagen 27. Mecanismo de escape tipo ancla en la parte superior, y un piñón con dientes de sierra en la parte inferior. Imagen propia.

El artículo de Carlos Mederos Martín (2004), *“Las matemáticas que se esconden detrás de los instrumentos: el reloj de péndulo”*, hace énfasis en cómo el conocimiento geométrico se convirtió en el fundamento conceptual de un objeto de conocimiento como el reloj de péndulo. La geometría no era un ejercicio especulativo, era y es un lenguaje de diseño y precisión. La noción de evoluta, la teoría de la cicloide y la propiedad de la tautocronía se articularon para resolver un problema práctico: la uniformidad para la medición de la duración. De este modo, el reloj de péndulo de Huygens es un ejemplo paradigmático de cómo la geometría fundamenta la estructura de los instrumentos de medición, y cómo estos instrumentos, a su vez, retroalimentan el desarrollo de las técnicas en geometría.

La evolución conceptual desde Galileo hasta Huygens muestra un tránsito de la intuición o sentido común a la formalización de las ideas. Galileo observó un fenómeno y lo interpretó empíricamente; Huygens, en cambio, buscó una justificación geométrica rigurosa. La diferencia entre ambos enfoques refleja la transición de una práctica experimental inaugural hacia una práctica más tecnificada. En este sentido, el reloj de péndulo puede considerarse como un símbolo del nacimiento de la ciencia moderna: un aparato construido sobre principios geométricos que responden a exigencias experimentales y tecnológicas.

Esta síntesis entre teoría y práctica representa la esencia del método experimental del siglo XVII.

El papel de la cicloide en este proceso no se limita al isocronismo, también ilustra el poder del estudio de las curvas especiales en la historia de la geometría. En el renacimiento y el barroco, las curvas no se estudiaban solo por curiosidad estética, sino por su utilidad en problemas concretos de mecánica, óptica, arquitectura, entre otros. La cicloide fue descrita por Galileo, estudiada por Roberval, analizada por Pascal y consagrada por Huygens. Su aparición en múltiples contextos – como la braquistócrona, la tautócrona y las evolutas – la convirtieron en una de las curvas más célebres de la historia, apodada “*la Helena de la Geometría*” por las disputas que suscitó.

3.6. Matemática del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide y evoluta³⁰.

El desarrollo matemático con base en el movimiento oscilatorio del péndulo, correspondiente al estudio de la cicloide y su evoluta, se presenta de manera detallada en el Anexo No. 1. En dicho anexo se desarrolla el tratamiento analítico y geométrico de estas curvas, con el propósito de fundamentar los aspectos teóricos que explican la isocronía del péndulo y su relevancia en la determinación del segundo como unidad de medida del tiempo.

³⁰ Análisis matemático desarrollado con base en el artículo “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*” elaborado por la Dr. Eréndira Mungia Villanueva y publicado en la revista *ConCiencia*, año 6, núm. 1. (2019). La Dr. Eréndira es egresada de la licenciatura en matemáticas de la universidad Juárez Autónoma de Tabasco y del doctorado en ciencias matemáticas de la UNAM.

Capítulo 4. Diseño, impresión y construcción de reloj de péndulo como potencial didáctico

“Cada reloj de péndulo fabricado en un periodo específico hereda innovaciones, costumbres y desarrollos de épocas anteriores.” (Sabrier, 1997)

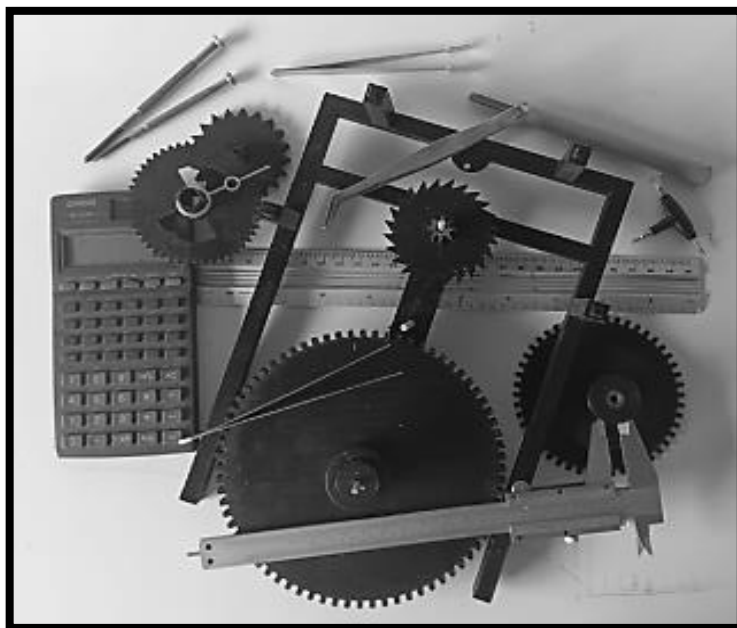


Imagen 28. Recursos e instrumentos para la construcción del reloj de péndulo. Fotografía tomada por el autor de la presente propuesta. Imagen propia.

4.1. Justificación de la construcción de un reloj de péndulo como estrategia investigativa.

El aparato construido que acompaña a esta propuesta no tiene como finalidad reproducir el reloj de péndulo diseñado por Huygens ni de operar estrictamente bajo los principios mecánicos del siglo XVII. Su propósito es configurar una situación experimental que permita a un profesor de física reflexionar sobre la medición de la duración mediante la observación de intervalos regulares generados instrumentalmente.

La construcción del aparato se nutre con el análisis histórico expuesto en los capítulos anteriores, retoma el problema central de producir una regularidad temporal a partir de un fenómeno físico. Sin replicar las soluciones técnicas de Huygens, el aparato construido recupera la lógica de este problema y la reinterpreta en una práctica experimental actualizada. Cada decisión técnica — la longitud del péndulo, el tipo de soporte, el material elegido, la forma de liberar el movimiento — influye en la manera en que se percibe y se mide la duración. De este modo, la construcción del aparato es un puente entre el análisis histórico, la reflexión epistemológica y la didáctica pedagógica para experimentar de forma situada las condiciones bajo las cuales la duración de un segundo adquiere sentido como magnitud medible.

Desde el punto de vista educativo, esta actividad tiene un alto potencial didáctico interdisciplinario. La construcción de un aparato de este tipo convoca nociones provenientes de la historia de la ciencia, la filosofía, la física, la ingeniería, la matemática y la tecnología. Este cruce de saberes produce una comprensión más amplia del fenómeno y rompe con la fragmentación curricular que suele caracterizar la enseñanza de la física. A nivel formativo, el proceso exige formular hipótesis, diseñar modelos, ensayarlos repetidamente y registrar variaciones; actividades que reproducen formas de trabajo científico y desarrollan habilidades como la observación rigurosa, el análisis crítico y la solución creativa a problemas.

La posibilidad de manipular un mecanismo, ajustar variables y observar el efecto de cada decisión técnica despierta la curiosidad, promueve el involucramiento emocional y facilita la construcción de vínculos significativos con la experiencia científica. Desde el punto de vista académico, este ejercicio abre preguntas que los documentos históricos no siempre resuelven: ¿qué limitaciones enfrentaron los constructores del siglo XVII? ¿Qué decisiones técnicas fueron cruciales para conseguir intervalos más estables?, al trabajar con materiales y recursos contemporáneos, se evidencian tensiones entre teoría y práctica que invitan a reinterpretar las fuentes de información desde nuevas perspectivas.

Además, esta construcción recupera la memoria de los instrumentos que transformaron la medición de la duración del segundo. En un entorno dominado por tecnologías digitales, la elaboración de un mecanismo oscilatorio hace visible la inventiva técnica de otros periodos históricos y estimula una reflexión crítica sobre la relación entre conocimiento científico, tecnología y cultura. El diálogo entre recursos actuales, como el modelado 3D o la impresión de componentes, y las ideas históricas en torno a la regularidad del movimiento, enriquece la comprensión del fenómeno y fortalece la articulación entre pasado y presente en la enseñanza de las ciencias naturales.

4.2. Diseño conceptual y plan de trabajo.

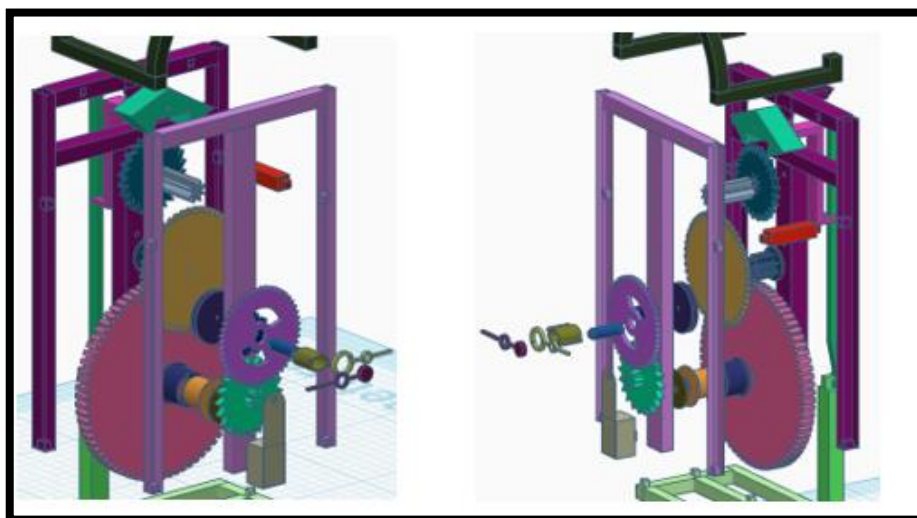


Imagen 29. Esquema de reloj de péndulo para observar los diferentes componentes construidos en la plataforma Tinkercad para la presente propuesta. Imagen propia.

El diseño conceptual para la construcción del reloj de péndulo exige, en primer lugar, establecer que el objetivo no es únicamente construir un aparato de medición histórico, sino comprender los fundamentos de su funcionamiento y su impacto en la conceptualización de la medición de la duración de un segundo. Este enfoque implica que el diseño debe estar sustentado tanto desde fuentes históricas directas — como el *HO* de Huygens — como con herramientas modernas de ingeniería y modelación 3D. El plan de trabajo se ha estructurado en varias fases que integran investigación documental, diseño técnico, fabricación y ensamble.

Primera Fase

Esta fase implicó un estudio detallado de los principios físicos que sustentan el funcionamiento del reloj de péndulo, en particular la isocronía del movimiento oscilatorio y su progresiva estabilización mediante dispositivos como las láminas “mejillas” cicloidales y el mecanismo de escape. El estudio se orientó a comprender cómo la regularidad del movimiento pendular fue interpretada, en el siglo XVII como una condición de posibilidad para la cuantificación del tiempo. En este sentido, la técnica se aborda como una forma de materialización del pensamiento científico. El péndulo se asume, por tanto, como un mediador entre las abstracciones geométricas y las prácticas experimentales con instrumentos de medición, que consolidaron una nueva relación entre naturaleza, medida y conocimiento.

También se realizó un estudio sobre controversias conceptuales que acompañaron la consolidación del reloj de péndulo, especialmente en torno a legitimidad de los dispositivos mecánicos como garantes de objetividad. Estas discusiones, en las que participaron figuras como Christiaan Huygens, Galileo Galilei, entre otros, permitieron evidenciar que haber establecido el movimiento oscilatorio del péndulo como referencia para la medición de la duración de un segundo no fue un logro puramente técnico, sino el resultado de un complejo convenio entre modelos teóricos, prácticas instrumentales y criterios de legitimidad epistémica.

El diseño conceptual de la investigación se fundamentó en la idea de que los instrumentos de medición científicos no sólo miden, también son objetos de conocimiento activos en la medición. Así, El reloj de péndulo se analizó, como una tecnología que transformó la experiencia de la medición de la duración de un segundo en una magnitud susceptible de ser estandarizada, reproducida y enseñada.

Segunda Fase

En la segunda fase, el uso de software de diseño asistido por computador, especialmente la plataforma Tinkercad, permitió ensayar hipótesis formales sobre las relaciones de transmisión, tolerancias geométricas entre piñones y estabilidad estructural del

conjunto de componentes del reloj de péndulo. Cada modificación en el entorno virtual operó como una forma de experimentación conceptual, en la que el mecanismo se convirtió en un sistema dinámico susceptible de análisis crítico.

El proceso de ajuste de las proporciones de los piñones y ruedas dentadas hizo visible la dimensión matemática propia de la regularidad del movimiento oscilatorio aplicado al reloj de péndulo. La simulación de las relaciones entre engranes evidenció que la transmisión de fuerza no es simplemente un requisito mecánico, sino una condición de posibilidad para la estabilización temporal del sistema. Asimismo, el diseño del mecanismo de escape permitió comprender su función como regulador del movimiento y garante de la regulación en la medición de la duración del segundo mediante oscilaciones. En este sentido, el entorno CAD constituyó un escenario de diálogo entre la geometría aplicada, la cinemática y la relojería desarrollada en el siglo XVII.

La integración de nuevos saberes en esta etapa del proyecto se consolidó con el diseño de los componentes para el reloj de péndulo, en el que convergieron prácticas propias de la física teórica, la geometría aplicada, la reconstrucción histórica y el uso de tecnologías para el diseño de piezas 3D. El diseño se asume como un proceso para el análisis y elaboración de los componentes de un objeto de conocimiento con potencial didáctico. De esta manera, el modelado preliminar se afirma como una práctica cognitiva fundamental dentro del desarrollo de la presente propuesta.

Tercera fase

Una tercera fase contempla la validación matemática y geométrica del diseño. Se trata de verificar si las relaciones entre las longitudes del péndulo, el periodo de oscilación y la geometría de las piezas se corresponden con los principios establecidos por Huygens en el *HO*. Aquí, la tautocronía de la cicloide, la isocronía de las oscilaciones y la transmisión del movimiento a través del mecanismo de escape se convierten en criterios fundamentales para evaluar la fidelidad del diseño conceptual. De este modo, la construcción del aparato es una demostración rigurosa de la técnica y la experticia desarrollada por el autor de la presente propuesta a partir del estudio histórico realizado.

La incorporación de los principios desarrollados por Christiaan Huygens en *HO* implicó una lectura crítica de la tautocronía de la cicloide y de la isocronía de las oscilaciones. La evaluación del diseño se centró en determinar hasta qué punto la geometría cicloidal aplicada a las láminas “mejillas” cicloidales del péndulo lograba reproducir el ideal teórico de oscilación independiente de la amplitud. Asimismo, el mecanismo de escape fue analizado como una interfaz entre la continuidad del movimiento físico y su discretización en unidades temporalmente significativas.

Cuarta fase

La cuarta fase está orientada al prototipado físico mediante impresión 3D y la fabricación artesanal de piezas que no se diseñaron digitalmente. Esta parte del plan de trabajo es importante porque pone a prueba la viabilidad práctica del diseño. El proceso de materialización del modelo conceptual abre nuevas preguntas y permite reflexionar sobre las limitaciones técnicas que se presentan al construir un modelo de reloj de péndulo. Así, el prototipo se convierte en un ejercicio de contrastación entre teoría e historia.

4.3. Modelación 3D del mecanismo (software CAD).

La modelación 3D del reloj de péndulo mediante software CAD: Tinkercad, compone una de las fases importantes del proceso de fabricación de cada componente, ya que permite trasladar los conceptos geométricos y matemáticos del diseño original hacia un entorno digital contemporáneo. Este paso ha facilitado la visualización detallada de cada componente y la simulación del comportamiento del mecanismo antes de su materialización. Así, se asegura que las proporciones, las relaciones geométricas y los movimientos se ajusten a los principios establecidos por Huygens en el *HO*.

El uso del recurso interactivo Tinkercad ha permitido modelar el mecanismo en sus partes fundamentales: tren de engranes, péndulo, mecanismo de escape y sistema de pesos. Cada uno de estos elementos fue modelado individualmente y luego ensamblado en un entorno digital, lo que concede una visión clara de su interacción y función en la estructura. Este procedimiento es valioso, pues permite comprender cómo cada componente cumple una

función específica dentro del conjunto, resaltando el carácter sistémico de los instrumentos científicos.

Una ventaja significativa de la modelación 3D fue la posibilidad de realizar ajustes en los parámetros. Por ejemplo, cuando se modifica, la longitud del péndulo, el número de dientes de cada piñón, el diámetro de una rueda dentada o de una polea, etc., se observa cómo estas variaciones afectan el periodo de oscilación y la regularidad del reloj. Este enfoque experimental, aunque en un entorno virtual, favoreció la comprensión de la relación entre variables físicas y diseño técnico, mostrando que la precisión de la medición de la duración de un segundo depende de un delicado equilibrio entre teoría y experimentación.

El diseño y luego la fabricación de cada componente del reloj de péndulo fue una experiencia tan desafiante como enriquecedora, en la que la precisión milimétrica y la paciencia del artesano se unieron. Cada piñón y soporte fue diseñado cuidadosamente en el software de modelado 3D, haciendo uso de herramientas digitales que permitían calcular con precisión el número de dientes de cada piñón necesarios para lograr la correcta relación de transmisión del movimiento. Sin embargo, el proceso no fue lineal: varios de los piñones debieron imprimirse múltiples veces, pues pequeños errores en el diseño inicial se traducían en desajustes que impedían el funcionamiento armónico del mecanismo. Cada impresión implicaba horas de trabajo, tanto en el diseño y la configuración de la impresora como en la espera de las piezas, que luego eran revisadas, corregidas y refinadas nuevamente en el software. Este proceso, aunque demandante, permitió comprender la delicada relación entre teoría y experimentación en la relojería. A ello se sumó el tiempo invertido — días enteros de pruebas, ajustes y mediciones — y los costos materiales de la impresión, que, aunque significativos, se justificaron plenamente al ver el avance gradual del mecanismo, pieza a pieza, hasta lograr un modelo reloj de péndulo funcional.

La modelación digital no permitió vincular completamente la geometría del péndulo con los principios matemáticos de la cicloide, la tautocronía y la isocronía, por lo que se hizo necesario fabricar manualmente algunas piezas. A través Tinkercad se dificultó construir superficies cicloidales y verificar cómo guían el movimiento del péndulo hacia oscilaciones de igual duración. Esto convirtió el diseño en un ejemplo, en donde los conceptos abstractos

de la matemática no se hacían visibles y manipulables en formas concretas. Así, mediante la creatividad se superó el problema, realizando modificaciones y acoples, que podían cumplir la misma función de otros componentes, y que permitirían el funcionamiento correcto del péndulo articulado al mecanismo.

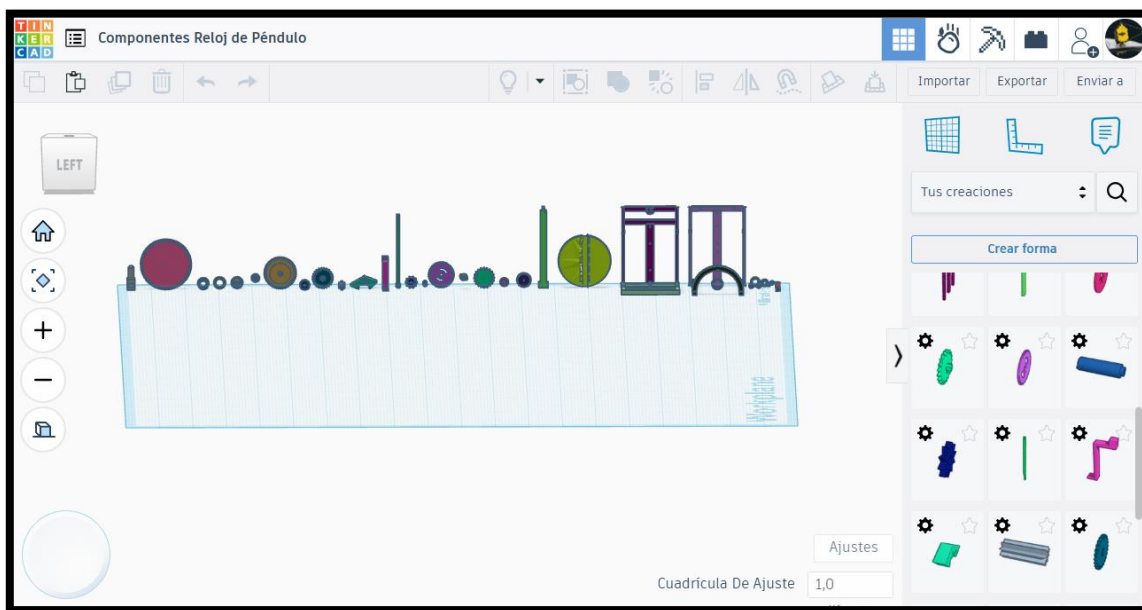


Imagen 30. Entorno virtual Tinkercad, en donde se elaboraron cada una de las piezas que se presentan en el anexo No. 2 de la presente propuesta. Clic en la imagen para que pueda observar en formato 3D cada una de las piezas construidas. Imagen propia.

La modelación 3D se convirtió en un recurso para la comprensión de varios aspectos sobre los mecanismos de relojería; diseñar las piezas detalladamente y ensamblarlas en un entorno virtual, simular su funcionamiento y analizar los posibles resultados ha fomentado un aprendizaje significativo, en el que la comprensión surge del diálogo con un objeto de conocimiento virtual que responde a unas condiciones. La modelación digital posibilitó la producción de un prototipo con potencial didáctico como objeto de conocimiento en escenarios educativos gracias a la impresión 3D. Los componentes diseñados en Tinkercad pueden exportarse a formatos compatibles con impresoras, permitiendo que las piezas del reloj sean materializadas con gran precisión. Este puente entre lo digital y lo tangible multiplica las posibilidades para explorar digitalmente el mecanismo, y luego observar cómo

esas simulaciones se traducen en piezas reales que deben ensamblarse y ponerse en funcionamiento.

El uso del software Tinkercad también abrió la puerta a la colaboración interdisciplinaria. Mientras que como estudiante de maestría en docencia de las ciencias naturales reflexionaba sobre las implicaciones epistemológicas del tiempo y su medición, los compañeros de trabajo y de la maestría, algunos licenciados, ingenieros y otros diseñadores aportaron su experiencia en modelado, simulación y optimización de mecanismos. Este cruce de saberes ha reflejado la naturaleza colectiva de la ciencia potenciando la capacidad de análisis y creación no solo del autor quien les escribe, sino también de quienes han participado de forma anónima en el desarrollo de la presente propuesta. Además, representa el espíritu del siglo XVII, en el que los relojeros, matemáticos y filósofos trabajaban conjuntamente para resolver problemas comunes.

La importancia de la modelación 3D en la presente propuesta plantea preguntas como: ¿Qué variaciones introdujo Huygens en comparación con relojes anteriores? ¿Qué tan precisas son sus descripciones cuando se trasladan a un entorno digital y a uno experimental? ¿Existen limitaciones técnicas en sus diseños que solo pueden evidenciarse al simularlos?, estas preguntas muestran que el trabajo desarrollado desde el diseño asistido por computador es un recurso tecnológico y una herramienta que puede interpretarse desde una perspectiva de los estudios enmarcados en la historia y filosofía de la ciencia.

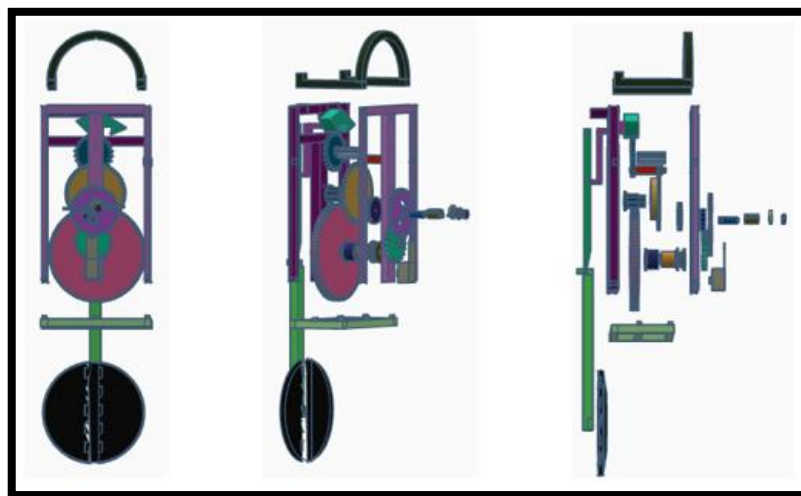


Imagen 31. La imagen presenta el modelo tridimensional de un reloj de péndulo diseñado en el software Tinkercad, mostrando tres vistas distintas en despiece de su estructura: frontal y lateral. En ella se observa la ubicación de cada uno de los componentes que conforman el mecanismo. Imagen propia.

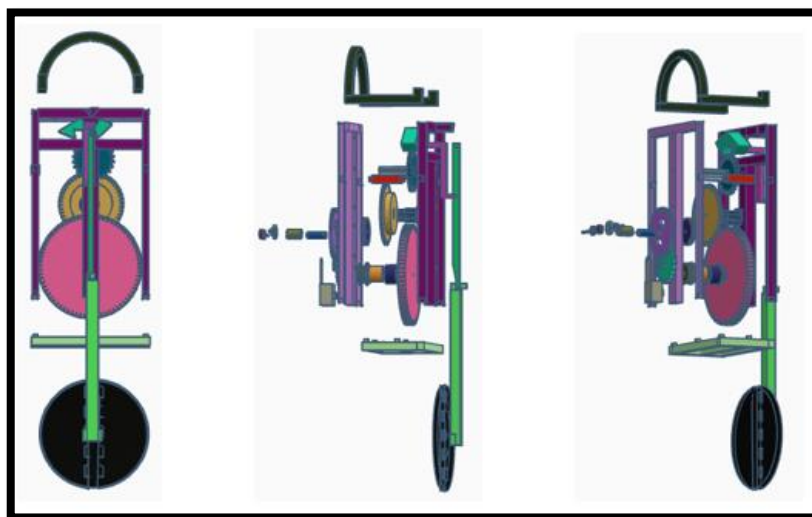


Imagen 32. El péndulo con su varilla y péndola en forma de lenteja en la parte inferior, el sistema de engranes compuesto por ruedas dentadas y piñones dispuestos en eje vertical, el escape tipo áncora, y la estructura de soporte que mantiene alineadas todas las piezas. Las diferentes vistas permiten apreciar la relación espacial entre los elementos y cómo el movimiento generado por el tren de engranes se transmite hasta el péndulo, reflejando con fidelidad el principio mecánico que regula la medición del tiempo en este tipo de relojes. Clic en la imagen para que pueda observar en formato 3D cada una de las piezas construidas³¹. Imagen propia.

³¹ <https://www.tinkercad.com/things/iOobWDEmImj-ensamble-of-reloj-de-pendolo-replica>

La modelación digital ha ofrecido la posibilidad de documentar y archivar todo el proceso, generando un repositorio de modelos (imágenes No. 31 y 32) que pueden compartirse con la comunidad académica. Esto asegura la replicabilidad de la propuesta y la convierte en un recurso abierto para la comunidad educativa interesada en reflexionar sobre los procesos de comprensión sobre la noción de la medición de la duración.

4.4 Diseño de componentes 3D.

La sección correspondiente al diseño tridimensional (3D) de cada uno de los componentes que conforman el reloj de péndulo construido para la presente propuesta se encuentra detallada en el Anexo No. 2. En este anexo se incluyen los diseños 3D elaborados para cada componente del mecanismo, permitiendo apreciar su estructura y medida milimétrica con vistas de perfil (largo, alto y ancho), con el fin de respaldar el análisis técnico y experimental desarrollado en el cuerpo principal del presente documento.

4.5. Fabricación e impresión 3D de componentes.

La fase de fabricación e impresión 3D de los componentes representa el momento en el cual las ideas plasmadas en el diseño conceptual y la modelación CAD se materializan en un prototipo tangible. Este paso pone en evidencia la relación entre teoría y experimentación. Así como en el siglo XVII los relojeros debían enfrentarse a los límites de la técnica artesanal, hoy el uso de impresoras 3D nos obliga a reflexionar sobre cómo la tecnología contemporánea permite — y al mismo tiempo condiciona — la construcción de este tipo de aparatos.

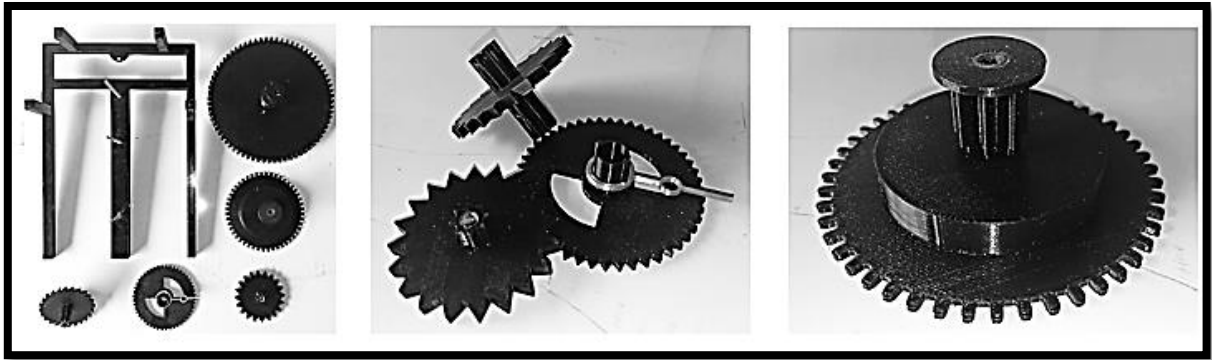


Imagen 33. En la imagen se observan algunos de los componentes fabricados mediante impresión 3D que conforman el mecanismo de un reloj de péndulo, diseñados y modelados digitalmente antes de su fabricación. Izquierda: se destaca la estructura principal o bastidor, encargada de sostener y alinear los diferentes ejes y engranes del sistema. Centro: se identifican también varios piñones y ruedas dentadas, cuidadosamente diseñados para garantizar una correcta relación de transmisión del movimiento.

Derecha: Engrane principal. Imagen propia.

El proceso de fabricación e impresión 3D comenzó con la preparación de los archivos digitales obtenidos del software Tinkercad. Estos archivos, exportados en formatos compatibles como STL u OBJ, deben adaptarse a las características específicas de la impresora, considerando parámetros como el tipo de filamento, la resolución de capa, la densidad del relleno y la orientación del componente en la plataforma. Cada decisión técnica influye en la resistencia, la precisión y la estética del componente impreso, lo que implica que la construcción del reloj de péndulo no es una tarea automática, sino un ejercicio de ensayo y error.

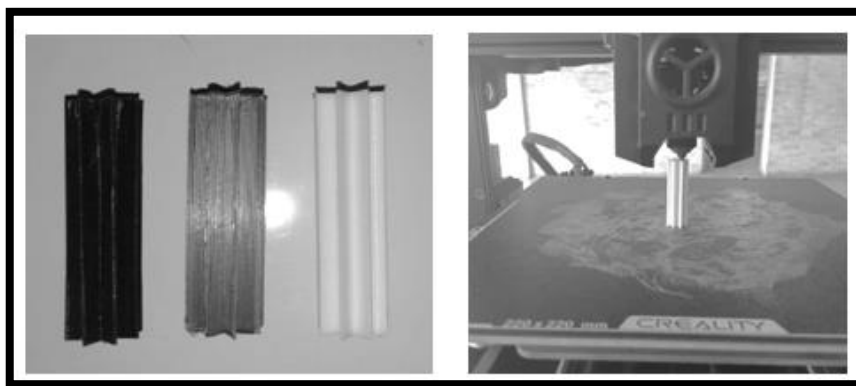


Imagen 34. Izquierda: Tres impresiones de la misma pieza que evidencian un proceso de ensayo y error que se presentó durante la fabricación de los componentes. Este es sólo un ejemplo de las tantas impresiones realizadas para ajustar la pieza a la necesidad requerida. Derecha: impresión del componente en impresora marca CREALITY. Imagen propia.

Los filamentos de PLA han sido los adecuados y escogidos para emprender este proyecto, este material es típicamente utilizado para imprimir piezas ligeras y de fácil fabricación. En algunos casos, ha sido necesario recurrir a filamentos compuestos con fibras especiales como ABS para garantizar la solidez de algunos componentes. Esta elección de materiales no solo responde a criterios de eficiencia técnica, sino que constituye una reflexión sobre cómo el material condiciona el funcionamiento de los instrumentos de medición, tanto en el pasado como en el presente.

Una de las principales ventajas de la impresión 3D es la posibilidad de modificar y construir múltiples versiones de una misma pieza con pequeñas variaciones. Esto permite experimentar con distintas configuraciones de engranes, escapes o longitudes del péndulo, observando cómo dichas modificaciones afectan la precisión del reloj. En este sentido, la impresión 3D crea un ambiente o escenario experimental en el que los principios de la cinemática y la metrología pueden ser explorados activamente.

4.6. Ensamble de componentes.

El ensamblaje de los componentes fabricados e impresos ha constituido la fase más crítica, pues exige precisión en el ajuste y alineación de los componentes. El tren de engranes debe girar suavemente, el escape debe interactuar con el péndulo de manera controlada y el

peso debe transmitir energía constante al sistema. Cualquier desajuste puede alterar la regularidad del movimiento y, por tanto, comprometer la calibración de la duración de la oscilación. Cada dificultad enfrentada — desde un engrane que no encaja hasta un péndulo mal calibrado — se ha convertido en una oportunidad de aprendizaje significativo.



Imagen 35. Ensamble de piezas del reloj de péndulo, tren de engrane principal; al lado algunas herramientas utilizadas para su construcción (vernier, regla, pinzas y destornilladores). Imagen propia.

En el ensamblaje de cada pieza se refleja la posibilidad de acercarnos a las tensiones entre teoría y práctica que vivieron los investigadores del siglo XVII. Al enfrentar dificultades técnicas en la construcción del prototipo, se ha logrado comprender mejor por qué Galileo, Mersenne, Riccioli y Huygens dedicaron tantos esfuerzos para refinar sus instrumentos. Cada error en el montaje actual es un eco de los desafíos históricos, y cada solución encontrada representa un puente entre el conocimiento moderno y la tradición científica.

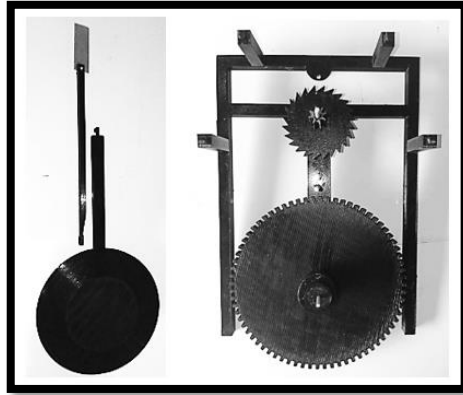


Imagen 36. Estas piezas, elaboradas mediante impresión 3D, muestran el nivel de detalle y precisión necesario para el funcionamiento del reloj, evidenciando el proceso de prueba y ajuste que implicó su fabricación: desde el cálculo del número de dientes y diámetros, hasta la verificación de su acople y desplazamiento en el mecanismo real. Imagen propia.

Una vez ensamblado, el prototipo del reloj de péndulo se ha sometido a pruebas de funcionamiento para evaluar su precisión y estabilidad. Estas pruebas permiten verificar si las oscilaciones del péndulo se mantienen isócronas, si el escape regula adecuadamente la energía y si el tren de engranes traduce correctamente el movimiento en la marcación de horas y minutos. Estas evaluaciones no solo tienen valor técnico, sino que constituyen prácticas experimentales que evidencian cómo la física de los siglos XVII y XXI se encuentran relacionadas mediante el estudio y construcción de un objeto de conocimiento.

El ensamblaje de los componentes ha constituido un momento clave para la presente propuesta con la construcción del reloj de péndulo, pues convierte el diseño conceptual y la modelación digital en una realidad palpable. Este proceso ha integrado aspectos históricos, tecnológicos y experimentales, mostrando que la ciencia se construye en la interacción entre teoría, instrumento de medición y práctica experimental.

4.7. Funcionamiento: tren de engranes, escape, peso y oscilación del péndulo.

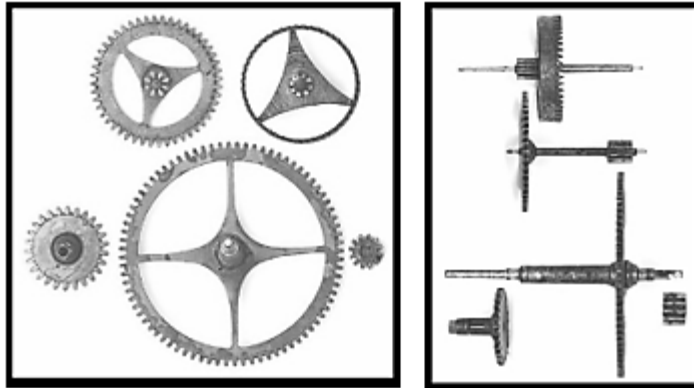


Imagen 37. Piñones originales del reloj de Thuret. Imagen tomada de “*Identificación y atribución del primer reloj de péndulo de Christiaan Huygens*”, en donde Jean-Claude Sabrier presenta fotografías de un reloj de péndulo del siglo XVII.

El funcionamiento del reloj de péndulo construido en el marco de la presente propuesta depende de la interacción coordinada de cuatro elementos fundamentales: el tren de engranes, el mecanismo de escape, el sistema de peso y el péndulo. Cada uno cumple una función específica, pero su eficacia depende de la relación armónica entre todos. En este sentido, el reloj de péndulo construido es un sistema integrado cuyo propósito es garantizar la regularidad de la medición de la duración de un segundo mediante oscilaciones del péndulo. Esta integración permite comprender que la precisión científica es el resultado de equilibrios delicados, donde la teoría y la técnica se entrelazan.

El tren de engranes de la imagen No. 38 constituye la columna vertebral del reloj de péndulo, ya que transmite el movimiento generado por el peso hacia las agujas que marcan el paso del tiempo. La relación entre el número de dientes de los engranes determina la proporcionalidad entre la oscilación del péndulo y la rotación de las agujas. Un cálculo incorrecto en esta proporción puede distorsionar la marcación, lo que demuestra cómo la precisión de la medición depende no solo de la teoría, sino también del ingenio. Así, los engranes se convierten en mediadores materiales entre la física del péndulo y la experiencia humana de medición.

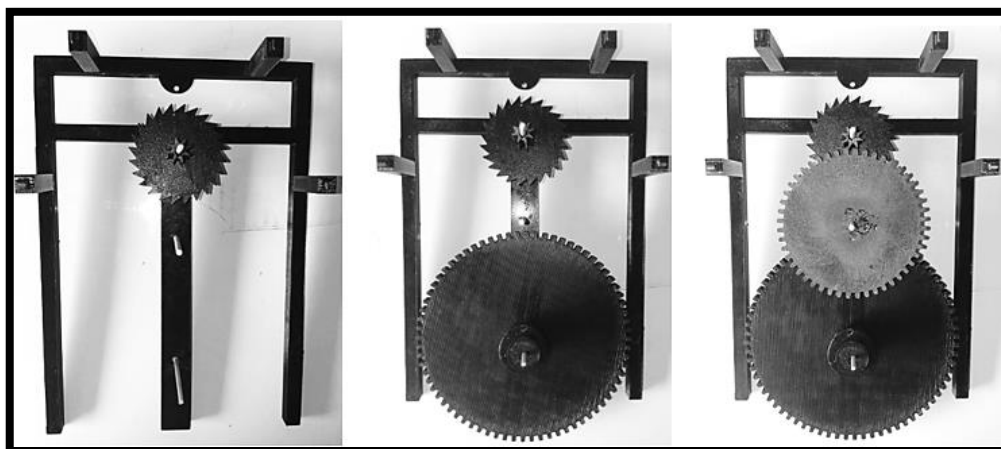


Imagen 38. La imagen muestra el tren de engranes principal, diseñado exclusivamente para el reloj de péndulo construido por el autor de la presente propuesta. Imagen propia.

El mecanismo de escape es el corazón regulador del reloj de péndulo. Su función es liberar gradualmente la energía transmitida por el peso, permitiendo que el péndulo oscile de manera controlada. Cada impulso que el escape da al péndulo compensa la pérdida de energía causada por la fricción y el aire, asegurando la isocronía de las oscilaciones. Este componente ilustra cómo un problema físico — la pérdida de energía — requiere una solución técnica e ingeniosa. El escape es un ejemplo de cómo la creatividad artesanal puede resolver cuestiones vinculadas a la regularidad de la medición de la duración.

Asimismo, el peso es el elemento encargado de suministrar la energía al sistema. Al descender bajo la acción de la aceleración gravitacional, transmite su movimiento al tren de engranes, que lo redistribuye hacia el escape y, finalmente, hacia el péndulo. Esta dependencia con la aceleración gravitacional conecta el funcionamiento del reloj con este principio universal de la física: la gravedad. Además, la variación en la masa o en la altura del péndulo afecta directamente el funcionamiento, lo que permite experimentar con la relación entre energía potencial, trabajo mecánico y duración de la oscilación.

El péndulo, como regulador principal del reloj de péndulo, sintetiza la interacción entre todos los elementos (Imagen No. 39). Su oscilación isócrona garantiza que cada liberación de energía ocurra en intervalos regulares. La idea es, ajustar la longitud del péndulo y observar cómo varía el periodo, y así percibir la ley de la isocronía formulada por

Galileo y refinada por Huygens. Este proceso ha evidenciado que la precisión en la medición de la duración no es un concepto abstracto, sino una experiencia observable que depende de parámetros físicos concretos.

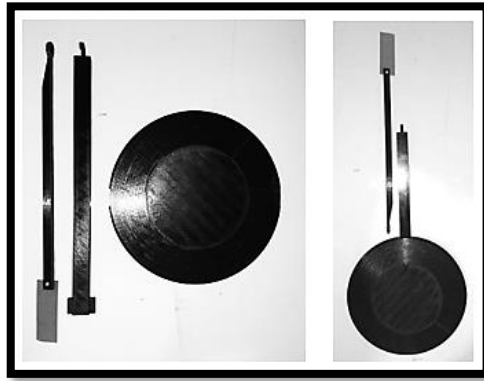


Imagen 39. Los cuatro componentes del péndulo fabricado: plástico flexible, soporte intermedio, soporte inferior y péndola. Imagen propia.

El funcionamiento coordinado de estos componentes evidencia la importancia de la precisión. Un engrane mal alineado, el mecanismo de escape desajustado o un peso mal dimensionado pueden romper la regularidad del sistema. La experiencia de ensamblar y ajustar un reloj de péndulo enseña que la ciencia no se basa únicamente en ideas, sino en prácticas cuidadosas que buscan reducir al mínimo las fuentes de error. De este modo, la construcción del reloj de péndulo se convierte en un escenario experimental donde se va descubriendo que la precisión científica es una conquista, no un punto de partida.

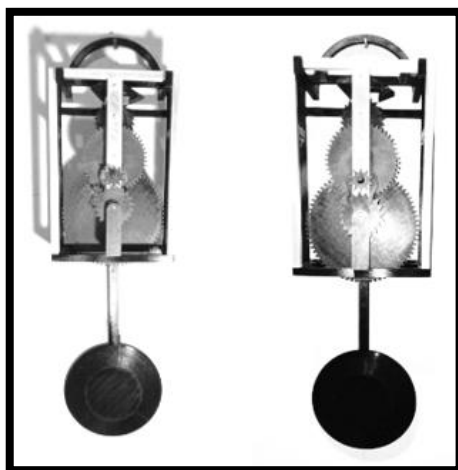


Imagen 40. Reloj de péndulo construido, no se colocó la tapa frontal en donde aparece la numeración típica del reloj con el objetivo de observar la ubicación y el funcionamiento de cada uno de los componentes. Imagen propia.

La construcción del reloj de péndulo también ha permitido reflexionar sobre las limitaciones técnicas de los instrumentos de medición del siglo XVII. Aunque revolucionario en su época, el reloj de Huygens aún estaba sujeto a errores derivados de la fricción, las variaciones térmicas y la imperfección de los materiales. Estas limitaciones se han percibido en el ejercicio de fabricación y ensamble, ofreciendo un punto de partida para discutir cómo la ciencia progresa enfrentando y resolviendo problemas técnicos. Así, la construcción del reloj de péndulo se convierte en una ventana para comprender la historia de la ciencia.

Un aspecto particularmente interesante del funcionamiento del reloj de péndulo es su capacidad para mostrar cómo la regularidad de la duración se construye socialmente a partir de un aparato técnico. Al observar el movimiento ordenado del péndulo y la marcación de las agujas, se logra comprender que la trazabilidad de la medición de la duración en el marco de la ciencia moderna es el resultado de un consenso basado en la fiabilidad de un instrumento. Esta reflexión tiene un gran valor formativo, pues permite cuestionar la relación entre técnica, conocimiento y sociedad.

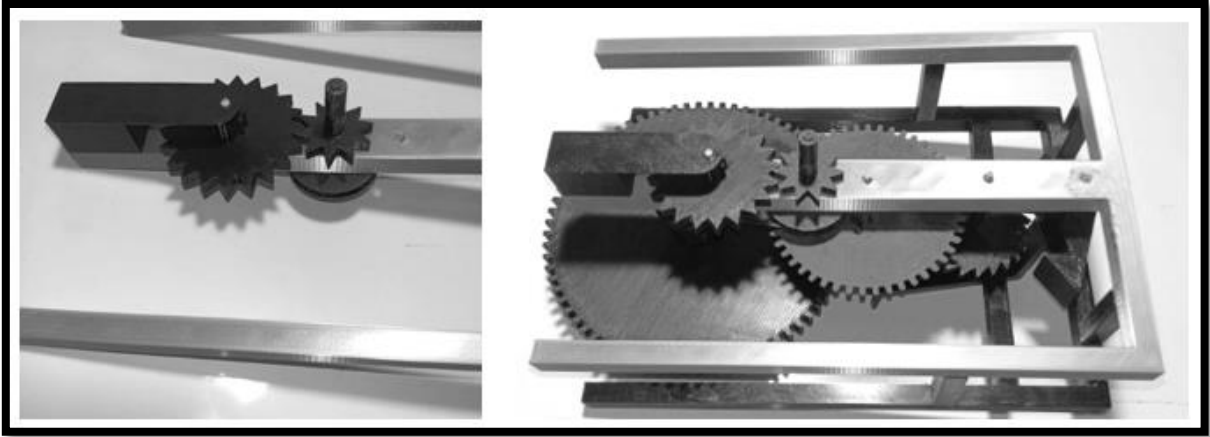


Imagen 41. Izquierda: Se percibe a detalle la polea que se conecta con el piñón minuterero que a su vez se engrana con el piñón doble propósito, que convierte el movimiento del piñón minuterero, al realizar una vuelta completa, en movimiento para el piñón horario. Derecha: Tren de engranes completo. Imagen propia.

El funcionamiento del reloj de péndulo pone de manifiesto la interdependencia entre tren de engranes, escape, peso y péndulo en la construcción de la medición de la duración de un segundo. Más allá de su valor histórico, esta reconstrucción ofrece un escenario científico en el que se ha logrado vivenciar cómo la ciencia combina teoría, técnica y práctica para producir conocimiento fiable. El reloj de péndulo es una metáfora material de la ciencia misma: un sistema complejo donde cada parte cumple un papel indispensable en la búsqueda de precisión y trazabilidad.

4.8. Construcción paso a paso del reloj de péndulo.

El proceso de ensamblaje de cada componente y ensamble integral del reloj de péndulo elaborado para la presente propuesta se describe detalladamente en el Anexo No. 3. En este anexo se presentan, paso a paso, las instrucciones técnicas, recursos utilizados y consideraciones necesarias para garantizar el funcionamiento del mecanismo, complementando así los aspectos teóricos y de diseño expuestos en el presente documento.

4.9. Potencial didáctico del reloj de péndulo.



Imagen 42. Montaje de la estructura del reloj de péndulo.

El potencial didáctico del reloj de péndulo se fundamenta, en primer lugar, en su capacidad para mediar entre el carácter abstracto de los conceptos físicos y la experiencia concreta del estudiante, al mismo tiempo que hace visibles dificultades técnicas que se tienen cuando se propone la construcción de este artefacto en la actualidad y otras que hicieron parte de la historia de la medición de la duración del segundo, como se ha analizado. En la enseñanza tradicional de la física, particularmente en el campo de la cinemática, nociones como tiempo, velocidad y aceleración suelen presentarse mediante expresiones matemáticas desarticuladas de problemas experimentales que hagan necesaria su formulación, lo que dificulta su apropiación significativa. El reloj de péndulo sitúa estos conceptos en un marco histórico y experimental, mostrando que la medición de la duración constituye una construcción técnica que emerge del tratamiento de limitaciones materiales, ajustes instrumentales y decisiones técnicas, que, entre otras cosas, hicieron posible el desarrollo mismo de la ciencia moderna.

Desde esta perspectiva, el reloj de péndulo se convierte en un objeto privilegiado para problematizar el concepto de tiempo empírico, *tempus relativum*, o duración. Al analizar su funcionamiento, se genera un escenario para la comprensión de que el segundo emerge como el resultado de la regularidad de un fenómeno físico cuidadosamente controlado. Esta aproximación resignifica la duración como magnitud medible, vinculada a la estabilización de oscilaciones periódicas que se relacionan con la amplitud, las pérdidas de energía por rozamientos o la necesidad de los mecanismos de escape que sostengan el movimiento, sin olvidar la necesidad histórica de establecer patrones estables para describir el movimiento. De este modo, el aprendizaje se desplaza de la memorización de definiciones hacia la comprensión de los procesos que hicieron posible su formulación.

En el contexto de la enseñanza de la física, el reloj de péndulo ofrece además un laboratorio tangible para explorar conceptos fundamentales como periodo, frecuencia, energía potencial, energía cinética y trabajo mecánico. Cada oscilación del péndulo materializa la transformación continua entre energía potencial gravitatoria y energía cinética, mientras que en el mecanismo de escape se analiza la transferencia controlada de energía en un sistema mecánico. En estos procesos, observables y experimentables con el aparato, se discuten leyes físicas que con frecuencia se presentan de manera excesivamente abstracta en la literatura científica.

El estudio detallado de los mecanismos de engranes y de escape también posibilita introducir nociones relacionadas con fuerzas, torque, rozamiento y disipación de energía. Así, el reloj de péndulo se presenta como un sistema en el que interactúan múltiples principios físicos cuya complejidad hace que se destaque la riqueza conceptual comprometida en la construcción del aparato. Esta característica lo convierte en un recurso con potencial didáctico de gran valor, capaz de promover una comprensión integral de la física y de superar enfoques fragmentados del conocimiento.

Otro aspecto central del potencial didáctico del reloj de péndulo reside en su carácter profundamente interdisciplinar. Su estudio articula física, historia de la ciencia, filosofía y tecnología en una misma experiencia de aprendizaje. Al analizar el desarrollo histórico del reloj, los estudiantes pueden aproximarse a los debates sostenidos por Galileo, Mersenne,

Riccioli y Huygens en torno a la regularidad del movimiento y la medición de la duración de un segundo. De este modo, la física deja de presentarse como un cuerpo de verdades acabadas y se revela como una empresa humana, atravesada por controversias, errores y avances progresivos.

Esta dimensión histórica favorece una comprensión más rica de la naturaleza del conocimiento científico. El reloj de péndulo se configura, así como un objeto de conocimiento sociocultural y científico que transformó profundamente la manera en que la humanidad organizó su experiencia temporal, tanto en la vida cotidiana como en la investigación científica. Integrar este tipo de reflexiones en los ambientes académicos ayuda a reconocer que los instrumentos científicos cumplen funciones técnicas, y también reconfiguran las formas de pensar y de habitar el mundo.

Desde una perspectiva epistemológica, el reloj de péndulo hace que se revise la idea de que las unidades de medida poseen un carácter absoluto e independiente de los instrumentos que las producen. Hay que reconocer que la noción de segundo emergió de un dispositivo mecánico sujeto a limitaciones materiales, e históricamente este aparato abre un espacio de reflexión sobre la dimensión convencional y social de las magnitudes físicas. Este ejercicio resulta fundamental en la formación científica crítica, pues se llega a comprender que la ciencia principalmente construye marcos de referencia que organizan nuestra experiencia.

En este sentido, el uso didáctico del reloj favorecería la comprensión de la estrecha relación entre instrumento y conocimiento. Sin la posibilidad de medir intervalos de tiempo de manera regular y confiable, fenómenos como el movimiento uniformemente acelerado o la caída libre difícilmente habrían podido ser estudiados con precisión. El reloj de péndulo enseña, entonces, que el avance de la física depende tanto del desarrollo teórico como de la invención y perfeccionamiento de instrumentos de medición. Esta comprensión amplía la visión de la ciencia como una práctica que integra pensamiento abstracto y artefactos materiales.

En síntesis, el potencial didáctico del reloj de péndulo es múltiple y profundamente productivo. Permite transformar la comprensión de conceptos fundamentales de la física

desde la experiencia, integrar historia y técnica, fomentar competencias investigativas y promover reflexiones críticas sobre la medición del tiempo. Al emplearlo en escenarios académicos, el reloj de péndulo invita a comprender que el “tiempo medido” es una construcción científica con profundas implicaciones históricas, filosóficas y socioculturales. De este modo, el reloj de péndulo se consolida como un recurso pedagógico con potencial didáctico que articula pasado y presente, teoría y práctica, ciencia e historia, enriqueciendo de manera sustancial la enseñanza de las ciencias naturales.

Conclusiones

Condiciones técnicas y epistemológicas para el surgimiento del reloj de péndulo y la noción de segundo

Del análisis histórico desarrollado se concluye que la aplicación del movimiento oscilatorio del péndulo en los mecanismos de relojería del siglo XVII es el resultado de una compleja convergencia entre experimentación, matematización geométrica y diseño mecánico. Los antecedentes experimentales de Galileo Galilei, particularmente sus observaciones sobre la regularidad del movimiento pendular y su independencia aproximada de la amplitud constituyeron un punto de convergencia decisivo en la comprensión de la duración como magnitud susceptible de ser mediada por fenómenos físicos regulares. Estas observaciones, aunque limitadas por las condiciones instrumentales de esa época, inauguraron una nueva sensibilidad hacia la medición del tiempo basada en la repetición controlada de un fenómeno natural.

Sobre esta base experimental se erige la contribución decisiva de Christiaan Huygens, quien logra trasladar el problema del isocronismo del péndulo desde el ámbito empírico hacia una solución rigurosamente geométrica. El diseño de las láminas cicloidales —las denominadas “mejillas”— constituye un ejemplo paradigmático de cómo la geometría se convierte en una herramienta de intervención sobre la naturaleza, orientando el movimiento de la péndola hacia una curva especial cuya propiedad tautócrona garantiza la igualdad de los tiempos de oscilación. Este tránsito desde la observación experimental hacia la construcción geométrica del fenómeno marca un momento clave en la historia de la física y de la metrología del tiempo.

Geometría, fenomenología y solución ingeniosa a problemas físicos

Del estudio desarrollado se afirma que la comprensión fenomenológica del reloj de péndulo exige reconocer el papel central que desempeñan los conceptos geométricos en la solución de problemas físicos concretos. La distinción entre curvas ordinarias y curvas especiales es una clave epistemológica que aporta en la comprensión de cómo ciertas formas geométricas poseen propiedades dinámicas singulares. La cicloide, en particular, se revela como un

parámetro geométrico de extraordinaria riqueza, capaz de ofrecer soluciones precisas a problemas relacionados con la medición de la duración de un segundo, el movimiento periódico y la regularidad natural.

Conceptos como evoluta, tautocronía e isocronía adquieren, en este contexto, un estatus que trasciende la geometría pura para inscribirse plenamente en la práctica experimental. La reflexión sobre la relación entre cicloide y su evoluta es un recurso para comprender el punto de partida que interviene en la duración de descenso y de oscilación del péndulo, presentando una forma de pensamiento profundamente moderna, en la que la matemática se configura y adapta a la naturaleza. Esta perspectiva refuerza la idea de que el conocimiento científico avanza mediante la invención de estructuras conceptuales capaces de intervenir en la realidad.

Desde esta perspectiva, el reloj de péndulo se configura como un aparato en el que confluyen intuición geométrica, creatividad técnica y sensibilidad experimental. La solución del problema del isocronismo se generó mediante la comprensión profunda de las propiedades matemáticas de las curvas. Esta manera ingeniosa de resolver situaciones físicas concretas ilustra el modo característico de hacer ciencia en el siglo XVII, en el que la frontera entre matemática, física y técnica se volvió deliberadamente productiva.

La construcción contemporánea del reloj de péndulo como experiencia fenomenológica e histórica

La experiencia de diseñar, fabricar y ensamblar un reloj de péndulo mediante herramientas de modelación contemporáneas presentó un escenario de acercamiento singular a las tensiones, crisis y dificultades inherentes a la relojería histórica. Lejos de tratarse de un ejercicio meramente reconstructivo, este proceso reveló la complejidad material implícita a los desarrollos conceptuales del siglo XVII. Cada error de diseño, cada componente que no coincidía con lo requerido, puso de manifiesto la fragilidad del equilibrio entre teoría y práctica.

La reiterada fabricación de piezas — en algunos casos hasta doce versiones de un mismo componente —, el gasto económico involucrado y el tiempo invertido en ajustes finos como

el lijado, la preparación de superficies y la calibración del sistema, constituyen una vivencia que aproxima al investigador a la figura histórica del relojero-instrumentalista. La paciencia exigida por el proceso y la necesidad de desarrollar una sensibilidad técnica específica lograron hacer reconocer que aparatos como el reloj de péndulo son una conquista progresiva, resultado de una interacción constante entre teoría, instrumento y experticia.

Esta experiencia práctica enriqueció de manera decisiva la interpretación histórica del reloj de péndulo como objeto de conocimiento. La construcción material del instrumento hizo emerger una fenomenología del quehacer científico, en la que cada línea de estudio histórico adquirió un nuevo significado. De este modo, la historia dejó de ser un relato distante para convertirse en una experiencia encarnada, en la que el segundo surge como una noción construida mediante esfuerzo, ingenio y persistencia.

Transformaciones en la práctica docente y en la percepción de la naturaleza

Desde la perspectiva del oficio de enseñar, particularmente en la enseñanza de la física, la construcción del reloj de péndulo y la elaboración del presente documento han tenido un impacto profundo tanto profesional como personalmente. El desarrollo de esta propuesta mejoró y enriqueció el discurso pedagógico, dotándolo de una densidad histórica y fenomenológica que trasciende la mera exposición de fórmulas y definiciones. El contacto directo con el objeto de conocimiento de forma técnica ha transformado la manera de comprender y comunicar los conceptos físicos fundamentales.

La experiencia investigativa ha favorecido una percepción más compleja de la naturaleza, entendida como una cadena de acontecimientos que muchas veces adquieren sentido a través de mediaciones instrumentales. Reconocer la fenomenología que subyace a cada representación — gráfica, ecuación o imagen — logró desarrollar una actitud reflexiva frente al conocimiento científico, en la que la aplicación del movimiento oscilatorio a la relojería y la medición de la duración de un segundo mediante oscilaciones se comprenden como construcciones históricas situadas.

En este sentido, el reloj de péndulo se ha convertido en un mediador epistemológico que transforma la práctica docente. La enseñanza de las ciencias naturales, particularmente la física se ve enriquecida al incorporar narrativas históricas, experiencias materiales y reflexiones filosóficas que permiten comprender que la ciencia es un proceso humano, cargado de tensiones, decisiones y creatividad.

Potencial didáctico, científico y sociocultural del reloj de péndulo construido

El reloj de péndulo construido y presentado en esta propuesta se configura como un aparato con un notable potencial didáctico, especialmente en escenarios educativos donde la cinemática ocupa un lugar central. Su estructura y funcionamiento se articulan de manera concreta con la medición de la duración de fenómenos y conceptos fundamentales como velocidad, aceleración y periodicidad. De este modo, el instrumento se convierte en un puente entre la experiencia sensible y la formalización conceptual.

En primer lugar, el reloj de péndulo permite analizar cómo su forma y estructura posibilitan la medición del segundo a partir de las oscilaciones del péndulo isócrono. En segundo lugar, pone de relieve la importancia histórica y epistemológica de los instrumentos de medición de la duración en las prácticas experimentales, mostrando que sin una noción estable de duración se dificultaría la sistematización. En tercer lugar, evidencia la trascendencia sociocultural del reloj de péndulo, inicialmente como regulador de la vida cotidiana y posteriormente como herramienta científica fundamental en escenarios científicos y luego en laboratorios científicos.

Finalmente, esta propuesta permite concluir que la medición de la duración del segundo mediante el movimiento oscilatorio del péndulo crea un escenario cognitivo en el que la duración dejó de ser una experiencia difusa para convertirse en una magnitud cuantificable y trazable.

Referencias bibliográficas

- BIPM. (2019). *The International System of Units (SI)*. Bureau International des Poids et Mesures.
- Blanché, R. (1955). *L'axiomatique*. Presses Universitaires de France.
- Blanché, R. (1966). *Le méthode expérimentale et la philosophie de la physique*. Presses Universitaires de France.
- Burton, E., (1992). *La historia de los relojes*. Little, Brown & Co. Londres.
- Dohrn-van Rossum, G. (1996). *History of the hour: clocks and modern temporal orders*. University of Chicago Press.
- Edwardes, E., (1977). *La historia del reloj de péndulo*. John Sherratt & Son. Altrincham.
- Ellis, B. (1966). *Basic Concepts of Measurement*. Cambridge University Press.
- Galison, P. (2003). *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*. W.W. Norton & Company.
- Hanson, N. (2005). *Observación*. En: Olivé, L., Pérez, A., “*Filosofía de la ciencia: teoría y observación*”. Editorial Siglo XXI México.
- Huygens, C. (1673/2005). *HOROLOGIVM OSCILLATORIVM, SIVE DE MOTV PENDVLORVM AD HOROLOGIA APTATO Demonstrationes Geometricae*. Apud F. MUGUET, Regis & Illuftriffimi Archiepifcopi Typographum, via Citharae, ad infigne trium Regum. PARISIIS
- Huygens, C. (1888/1950). *Œuvres complètes de Christiaan Huygens* (Vol. 13: Dioptrique, 1653, 1666, 1685-1692; Fascicules I & II). La Haya: Martinus Nijhoff, Société hollandaise des sciences. Forgotten Books, 2018, ISBN 978-0259000006 para el fascículo I; ISBN 978-0259346692 para el fascículo II).
- Jespersen, J. & Randolph. F., (1982). *De los relojes de sol a los relojes atómicos: comprensión del tiempo y la frecuencia*. Dover Publications. Nueva York.

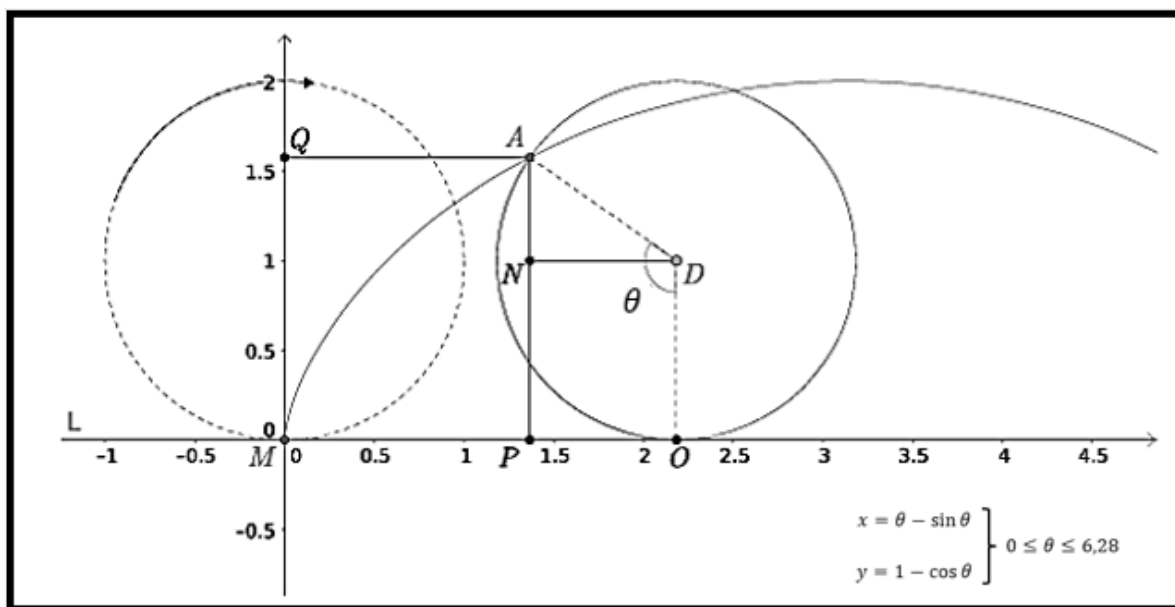
- Koninklijke, B., (2016). *Codices Hugeniani* - Leiden University Library³². Brill Ed. Leiden. ISSN: 2468-0303. (Año de publicación de la versión digital inicial: 2016)
- Kolb, D., (1984). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Prentice Hall.
- Koyré, A. (1966). *Galilée et l'expérience de pise, histoire d'une légende, En Eludes d'histoire de la pensée identifiq. P.U.F. Paris.*
- Koyré, A. (1973). *From the Closed World to the Infinite Universe*. Johns Hopkins University Press.
- Koyré, A. (1981). *Un experimento de medición. En estudios de historia del pensamiento científico*. Editorial Siglo XXI España.
- Laesser, O. (2021). *Les échappements en horlogerie mécanique: histoire des multiples solutions apportées à un seul problème*. Éditions Simonin. France.
- Landes, D. (2000). *Revolution in time: clocks and the making of the modern world*. Harvard University Press.
- Lefebvre, H. (2013). *La producción del espacio*. Blackwell.
- Malagón, F., Sandoval, S., Ayala, M. (2013). La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización. *Praxis filosófica Nueva serie*, No. 36, enero-junio 2013: 119 - 138. ISSN: 0120-4688
- Morin, E. (1996). *El problema del conocimiento del conocimiento*. En: Fischer, H., Retzer, A., Schweizer, J., “*El final de los grandes proyectos*”. Editorial Gedisa Barcelona.
- Moscovici, S. (1967). *L'Expérience du mouvement*. Hermann Ed. Paris.

³² El archivo personal de *Huygens* se ha compilado en la biblioteca universitaria de Leiden en los llamado *Codices Hugeniani*, que están disponibles con acceso libre en formato digital. Estos *Codices Hugeniani* están recopilados en 52 volúmenes e incluyen notas y carpetas con textos sueltos en los campos de astronomía, mecánica, matemáticas y música, además de libros anotados y correspondencia enviada/recibida.

- Nagel, E. (1981). *La estructura de la Ciencia: Problemas de la lógica de la investigación científica*. Editorial Paidós Barcelona.
- Newton, I. (1687/1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press.
- Piaget, J., & García, R. (1989). *Psicogénesis e historia de las ciencias*. Siglo XXI Editores.
- Plomp, R. (1979). *Spring-Driven Dutch Pendulum Clocks, 1657-1710*. Interbook International. Schiedam. B.V. ISBN 13: 978-9063970215.
- Popper, K. (1977). *El cuerpo y la mente*. Editorial Paidós Buenos Aires.
- Prigogine, K., (1977/2021). *El nacimiento del tiempo*. Editorial Booked. Barcelona
- Rudolph, J., (1983). *Make your own working paper clock*. Copyright © 2004 James Smith Rudolph. All right reserved. ISBN: 0060910666.
- Watney, J., (1999). *El misterio del tiempo*. Pitkin Editorial, Andover, U.K.
- Weinberg, S., (2015). *Explicar el mundo: el descubrimiento de la ciencia moderna*. Taurus Editores. Colombia.
- Whitrow, G., (1988). *Time in History: Views of Time from Prehistory to the Present Day*. Oxford University Press.
- Wineland, D., et al. (2013). *Atomic Clocks and the Redefinition of the Second*. Reviews of Modern Physics.
- Yoder, J., (2013). *A catalogue of the manuscripts of Christiaan Huygens, including a concordance with his Oeuvres complètes*. Brill Ed. Leiden.

Anexo No. 1. Matemática del movimiento oscilatorio del péndulo: cicloide y evoluta³³.

1. Ecuaciones paramétricas en función del ángulo de variación θ .



Gráfica No. [1]. Tomemos como origen del sistema coordenado el punto M . Al eje X lo llamaremos recta L y la circunferencia del círculo rodando con radio 1 [unidad]. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

Con base en la Gráfica No. [1] se desea encontrar matemáticamente el punto A en cualquier momento del rodamiento de la circunferencia por el eje L . Esta descripción matemática en términos de sus coordenadas sobre el movimiento del punto sobre la cicloide la denominaremos ecuaciones paramétricas.

Si la proyección del A en el eje L es el punto P , y en el eje y es el punto Q , y N es el punto de intersección de del radio de la circunferencia que pasa por el centro de la circunferencia D , y el segmento AP . Entonces la coordenada del eje L en el punto A es igual a la longitud

³³ Análisis matemático desarrollado con base en el artículo “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*” elaborado por la *Dr. Eréndira Mungia Villanueva* y publicado en la revista *ConCiencia*, año 6, núm. 1. (2019). La *Dr. Eréndira* es egresada de la licenciatura en matemáticas de la universidad Juárez Autónoma de Tabasco y del doctorado en ciencias matemáticas de la UNAM.

del segmento MP , y la coordenada en el eje y del punto A será igual a la longitud del segmento MQ . Llamemos θ al ángulo $\sphericalangle ADO$. Supongamos por ahora que $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ (Gráfica No.[1]).

Entonces podemos escribir que $\sphericalangle ADN = \theta - \frac{\pi}{2}$.

Y como el radio de la circunferencia es 1 [unidad],

Pues el segmento ND será $\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$, y el segmento NA será $\sen\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$.

Y como

$$\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\theta), \quad \text{y} \quad \sen\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos(\theta).$$

Teniendo el ángulo θ medido en [radianes], la disposición de θ será la medida del arco OA que tiene una longitud igual a la del segmento MO . Por lo tanto, las coordenadas de los ejes (x, y) en el punto A serán:

$$x = |MP| = |MO| - |PO| = \theta - \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \theta - \sen(\theta)$$

$$y = |MQ| = |PN| + |NA| = 1 + \sen\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = 1 - \cos(\theta)$$

Estas coordenadas de los ejes (x, y) solo se cumple para hallar otros puntos de la curva cicloide que se satisface en el intervalo $0 \leq \theta \leq 2\pi$. A estas coordenadas las llamaremos paramétricas debido a que describen las coordenadas como una función del parámetro θ .

2. Longitud de arco de la cicloide.

Luego de hallar las coordenadas paramétricas es necesario conocer la longitud del arco de cicloide completo para luego fraccionarlo y acceder al dato de la longitud de un segmento del arco. Para lograr este cometido es necesario parametrizar con el ángulo θ las

coordenadas paramétricas en dos puntos, desde el punto inicial de recorrido del ángulo θ_0 , hasta el punto final del recorrido del ángulo θ_1 . Por lo tanto, integramos las coordenadas paramétricas en función del ángulo θ , desde θ_0 hasta θ_1 :

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta}\right)^2} d\theta$$

Entonces al tomar θ como parámetro (Gráfica No. [1]) la longitud de la mitad del arco cicloidal se representa mediante:

$$\int_0^{\pi} \sqrt{(1 - \cos(\theta))^2 + (\sin(\theta))^2} d\theta = \int_0^{\pi} \sqrt{(1 - 2\cos(\theta) + \cos^2(\theta)) + \sin^2(\theta)} d\theta$$

Mediante la identidad trigonométrica y el método pitagórico reemplazamos: $\cos^2 + \sin^2 = 1$, y queda:

$$= \int_0^{\pi} \sqrt{1 - 2\cos(\theta) + 1} d\theta = \int_0^{\pi} \sqrt{2 - 2\cos(\theta)} d\theta = \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\theta)}$$

El truco es reemplazar $\sin^2 = 1 - \cos^2$, y factorizar el 2 dentro de la raíz para luego independizarla y dejar $1 - \cos(\theta)$ para luego reemplazarlo por $2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$, con base en las identidades trigonométricas conocidas:

Es decir, como $1 - \cos(\theta) = 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$, entonces:

$$= \int_0^{\pi} \sqrt{2 \left(2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)} d\theta = \int_0^{\pi} \sqrt{4\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} d\theta = \int_0^{\pi} 2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta$$

Recordemos que en el intervalo $[0, \pi]$, $\frac{\theta}{2} \in \left[0, \frac{\theta}{2}\right]$, el valor de $\frac{\theta}{2}$ es un valor positivo: $\frac{\theta}{2} \geq 0$

Integramos:

$$= \int_0^{\pi} 2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta$$

Luego utilizamos el método de sustitución:

$$u = \frac{\theta}{2} \quad ; \quad du = \frac{1}{2} d\theta \quad \therefore \quad d\theta = 2du$$

Para luego integrar:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin(u) \cdot 2du = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(u) du$$

Recordemos que la integral de $\sin(u)$, es $-\cos(u)$, reemplazamos en la integral:

$$4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(u) du = 4 \left[-\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + \cos 0 \right] = 4 [0 + 1] = 4$$

El resultado es:

$$\int_0^{\pi} \sqrt{(1 - \cos(\theta))^2 + (\sin(\theta))^2} d\theta = 4$$

El resultado obtenido representa sólo la mitad del arco completo de la cicloide, por lo tanto, la longitud completa la curva cicloidal es de 8 [unidades], solo cuando el radio del círculo que genera la cicloide es 1 [unidad].

Así, entonces la longitud del arco cicloidal desde el punto M hasta el punto A será:

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\theta}{2}} 4 \sin(u) du &= 4 \left[-\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - (\cos(0)) \right] = -4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - (-4 \cos(0)) = \dots \\ \dots &= -4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 4(1) = 4 - 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned}$$

En el proceso anterior es necesario recordar que $\cos(0) = 1$

El resultado será:

$$\int_0^{\frac{\theta}{2}} 4 \sin(u) du = 4 - 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

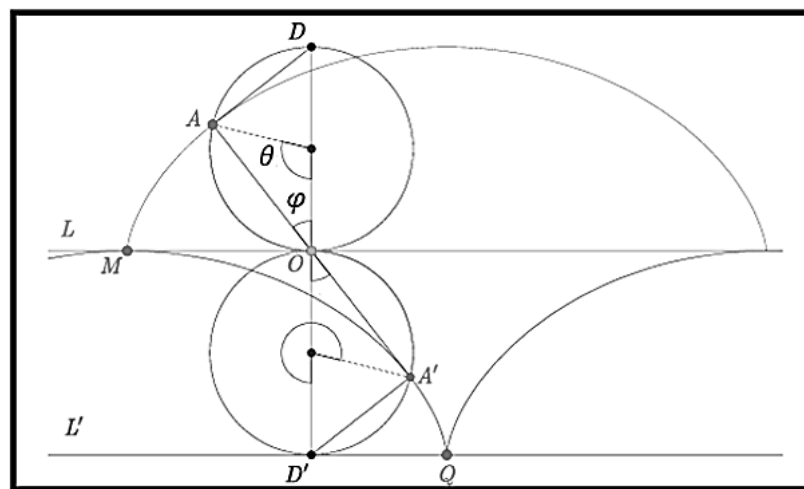
La longitud del arco cicloidal desde el punto M hasta el punto A más alto de la curva cicloidal la expresaremos con la letra H, de la siguiente manera:

$$H = 4 - 4 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] = 4 - 4 + 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Por lo tanto, el resultado es:

$$H = 4 - 4 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] = 4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Observemos la siguiente gráfica No. [2]:



Gráfica No. [2]. La gráfica muestra la construcción geométrica de la cicloide y su evoluta. Es importante observar las dos circunferencias generadoras de las curvas que ruedan sin deslizarse sobre líneas horizontales. Los ángulos θ y φ indican las posiciones angulares correspondientes del radio generador en cada punto de contacto de la rueda superior e inferior, respectivamente. Estos

ángulos permiten describir matemáticamente la relación entre la trayectoria cicloidal y su curva evoluta, principio geométrico del movimiento isócrono del péndulo cicloidal de Huygens. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

El valor de $4 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$, permite descubrir otras propiedades de la curva cicloidal mediante el comparativo con ángulos paramétricos, particularmente para el caso del ángulo φ , que se muestra en la gráfica No. [2].

$$4 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = 4 \sin(\varphi)$$

3. La solución de Huygens para la longitud del péndulo.

Para lograr calcular la longitud del péndulo que necesitó Huygens para su reloj de péndulo, es necesario jugar con la geometría de la cicloide. Observemos la gráfica No. [2] y ubiquémonos en el segmento de línea $|AA'|$, debido a que el triángulo OAD es rectángulo, y cuya hipotenusa es 2 [unidades]³⁴. Entonces:

$$|AA'| = 4 \cos(\varphi) = 4 \cos\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right) = 4 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Ahora, calculemos el valor de la longitud de la cicloide inferior que va desde el punto A' , hasta el punto Q , con el siguiente método:

$$\begin{aligned} arco(A'Q) &= 8 - 4 \left[1 - \cos\left(\frac{\pi + \theta}{2}\right) \right] = 4 + 4 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\theta}{2}\right)\right) = \dots \\ &\dots = 4 + 4 \sin\left(-\frac{\theta}{2}\right) = 4 - 4 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned}$$

El resultado será:

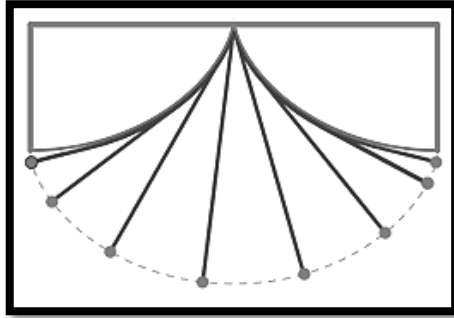
³⁴ La hipotenusa de este triángulo es el segmento $|AA'|$ que tiene un valor de 2 [unidades], debido a la suma de los radios de las dos circunferencias que trazan las curvas en la gráfica No. [2]. Recordemos que cada circunferencia posee un radio de 1 [unidad].

$$\text{arco}(A'Q) = 8 - 4 \left[1 - \cos\left(\frac{\pi + \theta}{2}\right) \right] = 4\left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

El valor de 8 representa la longitud completa de la curva cicloidal. Si sumamos la longitud del arco sobre la cicloide del punto Q al punto A' más la longitud del segmento $A'A$ el resultado será siempre

$$\text{arco}A'Q + AA' = 4 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + 4\left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) = 4$$

Y este resultado demuestra que la longitud del péndulo debe ser 4 veces la longitud del radio de la circunferencia que genera la curva cicloidal. En condiciones ideales³⁵, el movimiento del péndulo debe generar la descripción de una curva cicloidal proporcional a las dimensiones utilizadas en la construcción de esta.



Grafica No. [1]. La figura representa el movimiento cicloidal generado por un péndulo de longitud 4 veces mayor de la circunferencia que genera la forma cicloidal. El péndulo se mueve entre dos contornos sólidos con forma de láminas “mejillas” cicloidales. Al oscilar el péndulo, el hilo se ciñe a los contornos cicloidales. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

4. Ecuación diferencial para representar matemáticamente el movimiento isócrono cicloidal del péndulo.

Según las ecuaciones para calcular la longitud del péndulo, esta debe tener 4 veces la longitud del radio de la circunferencia que genera la curva cicloidal. Por lo tanto, el hilo del péndulo es inextensible y su peso es muy pequeño a comparación del de la péndola. Además, se puede considerar que el punto de peso máximo del péndulo está ubicado en la péndola,

³⁵ Para este caso particular las condiciones ideales se establecen omitiendo los factores ambientales que influyen en el movimiento oscilatorio del péndulo, como presión barométrica, temperatura, rozamiento del aire, aceleración gravitacional terrestre, humedad relativa, entre otros.

no hay necesidad de conocer sus dimensiones ni su masa para este cálculo en particular. Así mismo, no se tendrá en cuenta la fuerza de rozamiento del aire, ni el rozamiento del hilo contra las láminas “mejillas” cicloidales. Pero si se debe tener en cuenta, la aceleración gravitacional, debido a la influencia de esta frente a todo tipo de masas.

Es importante reconocer que, si bien conocemos algunos aspectos matemáticos relacionados con el movimiento pendular isócrono, no hay manera, por el momento, de determinar la posición del péndulo en cualquier momento de su movimiento. La idea es presentar una descripción que permita un acercamiento a esta necesidad, utilizando técnicas y procedimientos relacionados al cálculo, la geometría y la mecánica.

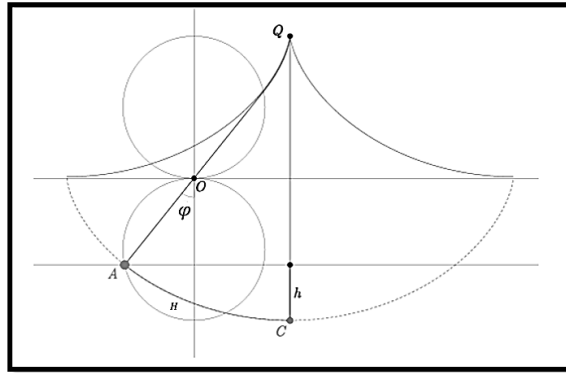
Si la péndola se ubica en el punto A de la cicloide que se describe en la gráfica No. [3], entonces el punto más bajo del recorrido de la péndola lo denotaremos con C. Ahora proyectemos las circunferencias con longitud de radio igual a 1 [unidad] para cada una; el ángulo φ , que se observa en la gráfica está medido en [radianes] y representa el movimiento pendular respecto a un marco de referencia bidimensional (tanto en el eje x como en el eje y), que esta denotado por la letra O. Además, el punto A se encuentra a mayor altura que el punto C, que es el punto de ubicación mínimo, la diferencia entre estas dos alturas la denotaremos por la letra h, y como el diámetro de la circunferencia es 2 [unidades] escribimos matemáticamente que:

$$\cos(\varphi) = \frac{2 - h}{|OA|}$$

Recordemos que la longitud del segmento $|OA|$ es igual a $2\cos(\varphi)$ (Gráfica N. [1]). Por lo tanto:

$$h = 2 - |OA| \cos(\varphi) = 2 - 2 \cos(\varphi) \cos(\varphi) = 2(1 - \cos^2(\varphi))^{36} = 2 \sin^2(\varphi)$$

³⁶ Inicialmente se realiza la factorización del número 2, y recordamos la identidad trigonométrica fundamental: $\sin^2(\varphi) = 1 - \cos^2(\varphi)$, aplicando esta identidad la ecuación se simplifica.



Gráfica No. [3]. La imagen muestra el recorrido cicloidal de un péndulo, representado por la curva trazada desde el punto superior A hasta el punto inferior C . En el movimiento se destaca el ángulo φ , formado entre la vertical y la posición del hilo en un instante determinado, que define la amplitud del desplazamiento. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

Ahora entonces teniendo en cuenta la letra H de la gráfica No. [3], la longitud del arco de la cicloide de A a C , será:

$$H = 4 \sin(\varphi)$$

Y, por lo tanto:

$$h = \frac{H^2}{8}$$

Esta ecuación permite identificar que cuando el péndulo está en la posición C , su energía potencial gravitacional es nula. Por el contrario, si la péndola se ubica en el punto A el valor de la energía potencial será:

$$E_{(Potencial)} = mgh = mg \left(\frac{H^2}{8} \right)$$

Ahora denotemos por v la rapidez con la que se mueve el péndulo, y el valor de la energía cinética del péndulo a cause de su rapidez será:

$$E_{(cinética)} = \frac{mv^2}{2}$$

Y sumando estas dos energías en el sistema del péndulo, se obtiene la energía total E_{total} (cuando se encuentra en el punto A):

$$E_{total} = mg \left(\frac{H^2}{8} \right) + \frac{mv^2}{2}$$

Para este caso particular el péndulo al moverse no genera ningún trabajo mecánico, porque hemos despreciado las fuerzas implicadas en este movimiento; entonces la energía del sistema pendular se conserva, es decir, la magnitud de E_{total} es constante.

Ahora de la ecuación anterior despejemos hacia un lado de la igualdad los valores constantes: energía total del sistema, masa y aceleración gravitacional terrestre:

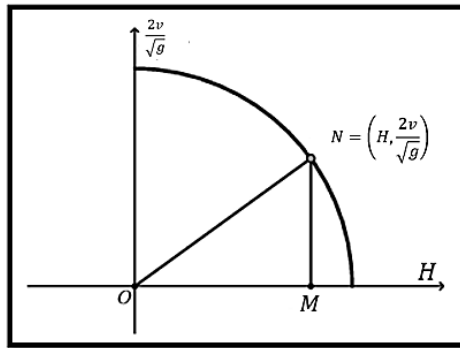
$$\frac{8E_{total}}{mg} = H^2 + \frac{4v^2}{g}$$

Es importante mencionar que las únicas cantidades que varían en función de la posición del cuerpo P son H y v . De acá podemos deducir que como v es la velocidad del cuerpo P y H representa el avance de dicho cuerpo, entonces la derivada de H respecto del tiempo será igual a v :

$$\frac{8E_{total}}{mg} = H^2 + \frac{4}{g} \left(\frac{dH}{dt} \right)^2$$

Esta ecuación diferencial, significa una expresión de H en función del tiempo. Es decir, una vez se encuentra la solución a esta ecuación, se accede al valor numérico de la posición y de la velocidad del péndulo después de t [segundos] de duración, de haberlo soltado para su oscilación.

5. Solución a la ecuación diferencial para calcular la amplitud y la rapidez del movimiento pendular cicloidal.



Gráfica No. [4]. Plano cartesiano, sobre el eje de las abscisas la magnitud H y sobre su eje ordenado la magnitud $\left(\frac{2v}{\sqrt{g}}\right)$. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

En la Gráfica No. [4] se representa un punto mediante la letra N , con coordenadas H y $\left(\frac{2v}{\sqrt{g}}\right)$. La gráfica tiene un punto de origen representado por la letra O , la letra M representa la intersección vertical que pasa por N , que se ubica en el eje de las abscisas, por lo tanto, el segmento ON se puede calcular usando el teorema de Pitágoras:

$$|ON| = \sqrt{|MN|^2 + |OM|^2} = \sqrt{\frac{4v^2}{g} + H^2}$$

Teniendo en cuenta que:

$$\frac{8E_{total}}{mg} = H^2 + \frac{4v^2}{g}$$

Entonces reemplazamos y queda:

$$|ON| = \sqrt{\frac{8E_{total}}{mg}}$$

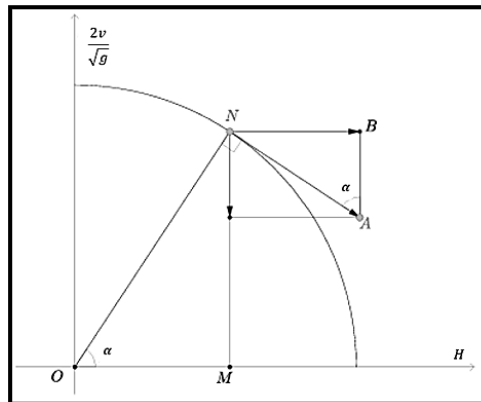
En el movimiento del péndulo, al oscilar de un lado a otro, las magnitudes H y v , varían en función de la duración del movimiento. Esto quiere decir en términos geométricos que el punto N se moverá en el plano en que se tomó el sistema de coordenadas, pero la distancia de dicho punto al origen será siempre la misma, porque los valores dentro de la raíz son constantes:

$$\sqrt{\frac{8E_{total}}{mg}}$$

Lo que permite evidenciar matemáticamente que el punto N sólo se moverá sobre una circunferencia de radio

$$R = \sqrt{\frac{8E_{total}}{mg}}$$

A esta circunferencia se le denomina circunferencia de fases (Gráfica No. [4]). Y permite desarrollar un cálculo dentro de un intervalo específico de movimiento del punto N , para calcular la velocidad tangencial en cada punto de dicha circunferencia. En la gráfica No. [5] se hace una representación de la velocidad tangencial mediante el vector NA .



Gráfica No. [5]. La imagen muestra una representación geométrica del movimiento de una partícula a lo largo de una trayectoria curva, donde se ilustran las componentes del desplazamiento y los ángulos involucrados. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

Con ayuda de la gráfica No. [5], se descompone el vector NA , y sólo tenemos en cuenta la componente horizontal que está representada por el segmento NB . Este segmento representa la velocidad con la que se traslada M sobre el eje x proyectando el movimiento de N . Observemos que el intervalo de desplazamiento de la proyección de N es de O hasta H , por lo tanto, se puede argumentar que la derivada de H respecto de la duración de su movimiento será la velocidad:

$$v = \frac{dH}{dt}$$

Es decir que:

$$NB = v$$

Ahora, analicemos la semejanza entre los triángulos que se generan en la gráfica No. [5]: los triángulos ONM y NAB , y aplicando razones trigonométricas³⁷ obtenemos que:

$$\frac{|MN|}{|ON|} = \frac{|NB|}{|NA|}$$

De esta igualdad sabemos que:

$$|MN| = \frac{2v}{\sqrt{g}} \quad ; \quad |ON| = R \quad ; \quad |NB| = v$$

Por lo tanto:

$$\frac{\frac{2v}{\sqrt{g}}}{R} = \frac{v}{|NA|}$$

Despejando $|NA|$ obtenemos:

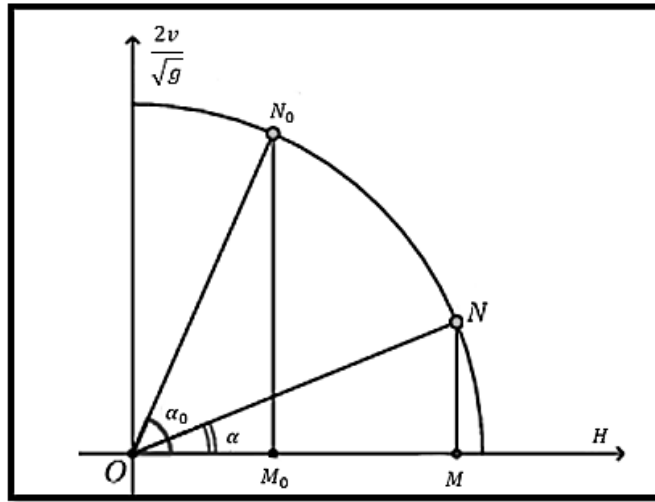
$$|NA| = \frac{R\sqrt{g}}{2}$$

Y esta sería la fórmula para calcular la velocidad con la que N se mueve sobre la circunferencia (Gráfica No. [5]). La letra R en la anterior ecuación representa el radio de la circunferencia de fase:

$$R = \sqrt{H_0^2 + \frac{4v_0^2}{g}}$$

De la anterior ecuación se representa H_0 y v_0 respectivamente como la amplitud de la oscilación y la rapidez del péndulo en un instante inicial. (Gráfico No. [6]).

³⁷ $\text{sen } \alpha = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}}$



Gráfica No. [6]. La imagen muestra los puntos N y N_0 , en los que se analiza la relaciones entre los ángulos, la altura y el desplazamiento horizontal. Imagen tomada y modificada de “*La cicloide, la curva del ritmo perfecto*”.

Al moverse el péndulo en función de su duración medida en segundos, desde N_0 hasta N va adquiriendo una rapidez de $\frac{R\sqrt{g}}{2}$, y la distancia recorrida despejando el tiempo en la ecuación será $\frac{R\sqrt{g}}{2}t$, de acá se deduce que la magnitud del ángulo $\sphericalangle N_0ON$ será medida en radianes igual que $\frac{t\sqrt{g}}{2}$ (Gráfica No. [6]).

Así,

$$\varphi = \sphericalangle MON = \sphericalangle M_0ON_0 - \sphericalangle N_0ON = \alpha_0 - \frac{t\sqrt{g}}{2}$$

Entonces,

$$|OM| = R \cos(\alpha) = R \cos\left(\alpha_0 - \frac{t\sqrt{g}}{2}\right) = R \cos\left(\frac{t\sqrt{g}}{2} - \alpha_0\right)$$

$$|NM| = R \sin(\alpha) = R \sin\left(\alpha_0 - \frac{t\sqrt{g}}{2}\right) = -R \sin\left(\frac{t\sqrt{g}}{2} - \alpha_0\right)$$

Recordemos que

$$|OM| = H$$

$$|MN| = \frac{2v}{\sqrt{g}}$$

Se tiene que

$$H(t) = R \cos\left(\frac{t\sqrt{g}}{2} - \alpha_0\right)$$

$$v(t) = -R \sin\left(\frac{t\sqrt{g}}{2} - \alpha_0\right)$$

Fórmulas con las que se expresan la amplitud de la oscilación y la rapidez del movimiento pendular en función del tiempo medido en segundos.

6. Periodo de oscilación

Entonces al calcular la amplitud de la oscilación y la rapidez del movimiento del péndulo ¿Cuánto tardará el péndulo en realizar una oscilación? Desarrollemos el análisis matemático, necesitamos encontrar un periodo de oscilación T tal que,

$$H(t) = H(t + T)$$

$$v(t) = v(t + T)$$

Las ecuaciones del movimiento pendular se analizan desde las curvas perfectas generadas por las funciones *sin* y *cos*, y estas funciones adquieren periodos de 2π , entonces los valores para la expresión $\frac{t\sqrt{g}}{2} - \alpha_0$ en los instantes t y $t + T$ serán diferentes con un desfase de 2π :

$$\frac{\sqrt{g}}{2}(t + T) - \alpha_0 = \frac{\sqrt{g}}{2}t + (-\alpha_0) + 2\pi$$

Despejando el periodo de oscilación T de la anterior expresión obtenemos:

$$T = \frac{4\pi}{\sqrt{g}}$$

Con base en la ecuación anterior, del periodo T , en la que se evidencia que no depende del valor inicial H_0 , entonces el péndulo tardará el mismo tiempo en ir y regresar sin importar en qué posición comienza a oscilar, cumpliendo las propiedades de isocronía y tautocronía del movimiento oscilatorio.

7. Cálculo numérico: ¿qué longitud del péndulo corresponde a un segundo?

Si queremos que la semioscilación (medio ciclo) dure 1 [segundo] —esto equivale a que la oscilación completa dure $T = 2$ [segundos] — se reemplaza:

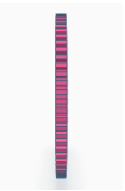
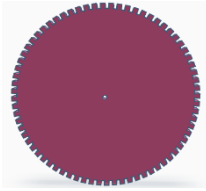
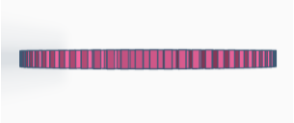
$$T = 2 \text{ s} \Rightarrow L = \frac{gT^2}{4\pi^2}.$$

Tomando la aceleración gravitacional terrestre como $g \approx 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$,


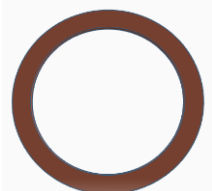

$$L = \frac{9.81 \times (2)^2}{4\pi^2} \approx 0.994 \text{ m}.$$

Es decir, aproximadamente la longitud del péndulo debe ser de 0.994 metros; esto coincide con la longitud histórica que Huygens indicó (en unidades de su tiempo se expresaba como 3 pies parisinos y $8\frac{1}{2}$ líneas ≈ 99.4 cm). (El razonamiento numérico anterior es directo a partir de la expresión del periodo.)

Anexo No. 2. Dimensiones de piezas para la construcción del reloj

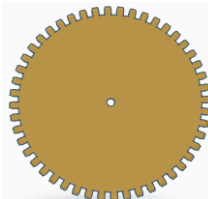
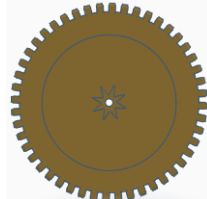
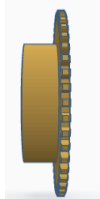
Pieza: 01 - Piñón Principal		No. 01
		
Largo: 14,8 [mm]	Ancho: 14,8 [mm]	Alto: 8,24 [mm]
Característica: Piñón Principal 60 Dientes		

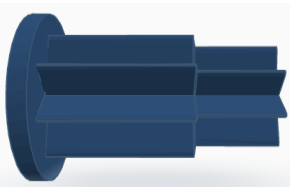


Pieza: 02 - Corona interna dentada		No. 02
		
Largo: 19,0 [mm]	Ancho: 31,0 [mm]	Alto: 31,0 [mm]
Característica: Corona interna dentada 36 Dientes		




Pieza: 03 - Anillo Exterior		No. 03
		
Largo: 32,0 [mm]	Ancho: 32,0 [mm]	Alto: 1,5 [mm]
Característica: Anillo Exterior		




Pieza: 04 - Corona externa dentada		No. 04
		
Largo: 24,0 [mm]	Ancho: 30,8 [mm]	Alto: 30,8 [mm]
Característica: Corona externa dentada 36 Dientes		

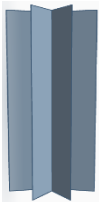
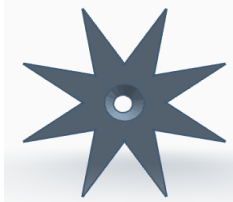

Pieza: 05 - Tambor de acoplamiento		No. 05
		
Largo: 19,6 [mm]	Ancho: 19,6 [mm]	Alto: 4,5 [mm]
Característica: Tambor de acoplamiento		



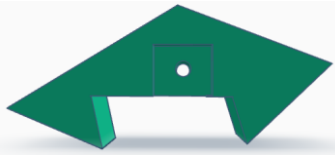
Pieza: 06 - Piñón cilíndrico		No. 06
		
Largo: 92,0 [mm]	Ancho: 92,0 [mm]	Alto: 12,0 [mm]
Característica: Piñón cilíndrico de 48 dientes.		

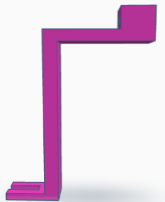


Pieza: 07 - Piñón de 8 alas externas		No. 07
		
Largo: 34,0 [mm]	Ancho: 20,3 [mm]	Alto: 20,3 [mm]
Característica: Piñón de 8 alas externas		




Pieza: 08 - Rueda de escape 30 alas		No. 08
		
Largo: 56,7 [mm]	Ancho: 56,7 [mm]	Alto: 4,0 [mm]
Característica: Rueda de escape 30 alas		


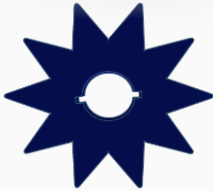

Pieza: 09 - Acople cilíndrico para aguja minuterera		No. 09
		
Largo: 30,0 [mm]	Ancho: 8,0 [mm]	Alto: 8,0 [mm]
Característica: Acople cilíndrico para aguja minuterera		

Pieza: 10 - Piñón de 8 alas largo		No. 10
		
Largo: 40,5 [mm]	Ancho: 14,2 [mm]	Alto: 14,2 [mm]
Característica: Piñón de 8 alas para transmisión al escape		

Pieza: 11 - Escape tipo áncora		No. 11
		
Largo: 73,5 [mm]	Ancho: 20,0 [mm]	Alto: 33,4 [mm]
Característica: Escape tipo áncora		




Pieza: 12 - Horquilla de acoplamiento al escape		No. 12
		
Largo: 90,0 [mm]	Ancho: 14,0 [mm]	Alto: 41,6 [mm]
Característica: Horquilla de acoplamiento al escape		


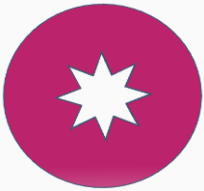

Pieza: 13 - Soporte intermedio del péndulo		No. 13
		
Largo: 240,0 [mm]	Ancho: 24,5 [mm] – 5,0 [mm]	Alto: 26,6 [mm]
Característica: Soporte intermedio del péndulo		




Pieza: 14 - Piñón minuterero 10 alas con acople interno		No. 14
		
Largo: 29,8 [mm]	Ancho: 29,8 [mm]	Alto: 5,0 [mm]
Característica: Piñón minuterero 10 alas con acople interno		




Pieza: 15 - Piñón horario		No. 15
		
Largo: 71,5 [mm]	Ancho: 71,5 [mm]	Alto: 3,0 [mm]
Característica: Piñón horario de 60 dientes con acople interno		


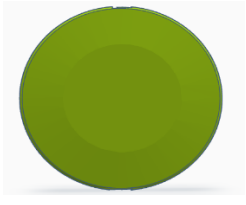

Pieza: 16 - Acople cilíndrico para aguja horaria		No. 16
		
Largo: 19,0 [mm]	Ancho: 16,9 [mm]	Alto: 11,7 [mm]
Característica: Acople cilíndrico para aguja horaria		

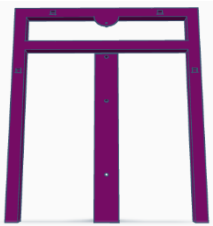


Pieza: 17 - Piñón doble propósito		No. 17
		
Largo: 55,6 [mm]	Ancho: 55,6 [mm]	Alto: 13,0 [mm]
Característica: Dientes piñón pequeño: 8, Dientes piñón grande: 20		

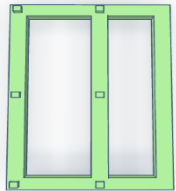


Pieza: 18 – Anillo con alas internas		No. 18
		
Largo: 22,0 [mm]	Ancho: 22,0 [mm]	Alto: 5,0 [mm]
Característica: Dientes internos: 8		

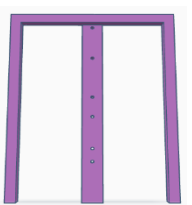


Pieza: 19 - Polea		No. 19
		
Largo: 38,6 [mm]	Ancho: 38,6 [mm]	Alto: 5,0 [mm]
Característica: Polea		

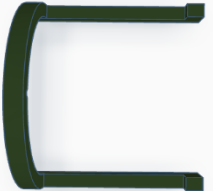

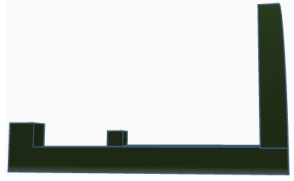
Pieza: 20 - Soporte inferior del péndulo		No. 20
		
Largo: 230,0 [mm]	Ancho: 7,3 [mm]	Alto: 20,0 [mm]
Característica: Soporte inferior del péndulo		




Pieza: 21 - Péndola		No. 21
		
Largo: 160,0 [mm]	Ancho: 160,0 [mm]	Alto: 14,5 [mm]
Característica: Péndola		




Pieza: 22 - Marco Trasero		No. 22
		
Largo: 240,0 [mm]	Ancho: 170,0 [mm]	Alto: 10,0 [mm]
Característica: Marco Trasero		


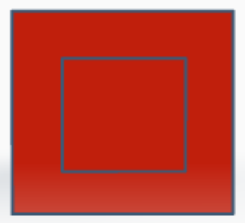

Pieza: 23 - Marco Inferior		No. 23
		
Largo: 170,0 [mm]	Ancho: 101,0 [mm]	Alto: 10 [mm] – 15 [mm]
Característica: Marco Inferior		




Pieza: 24 - Marco Frontal		No. 24
		
Largo: 240,0 [mm]	Ancho: 170,0 [mm]	Alto: 10,0 [mm]
Característica: Marco Frontal		

Pieza: 25 - Percha		No. 25
		
Largo: 115,0 [mm]	Ancho: 150,0 [mm]	Alto: 85,0 [mm]
Característica: Percha		

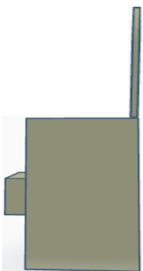
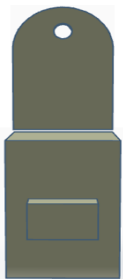
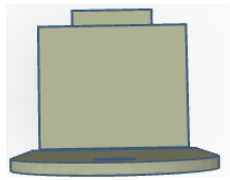
Pieza: 26 - Aguja Horaria		No. 26
		
Largo: 60,0 [mm]	Ancho: 10,0 [mm]	Alto: 1,0 [mm]
Característica: Aguja Horaria		

Pieza: 27 - Aguja Minutera		No. 27
		
Largo: 103,0 [mm]	Ancho: 9,0 [mm]	Alto: 1,0 [mm]
Característica: Aguja Minutera		

Pieza: 28 - Soporte lateral		No. 28-29-30-31
		
Largo: 52,0 [mm]	Ancho: 10 [mm]	Alto: 10 [mm] – 5 [mm]
Característica: Marco lateral x4		

Pieza: 32 - Anillo de prueba grueso		No. 32
		
Largo: 32,0 [mm]	Ancho: 32,0 [mm]	Alto: 3,0 [mm]
Característica: Anillo de prueba		

Pieza: 33 - Anillo de Prueba delgado		No. 33
		
Largo: 32,0 [mm]	Ancho: 32,0 [mm]	Alto: 1,5 [mm]
Característica: Anillo de Prueba pequeño		

Pieza: 34 - Seguro		No. 34
		
Largo: 70,0 [mm]	Ancho: 20,0 [mm]	Alto: 18,0 [mm]
Característica: Seguro		

Anexo No. 3. Construcción paso a paso del reloj de péndulo

1. Se ensambla el marco frontal, trasero, inferior y los laterales. Se realizan orificios en los marcos delantero y trasero. Debemos asegurar de que estén alineados. Se utiliza una varilla de madera de 2 mm de diámetro. (imagen No. [1]).

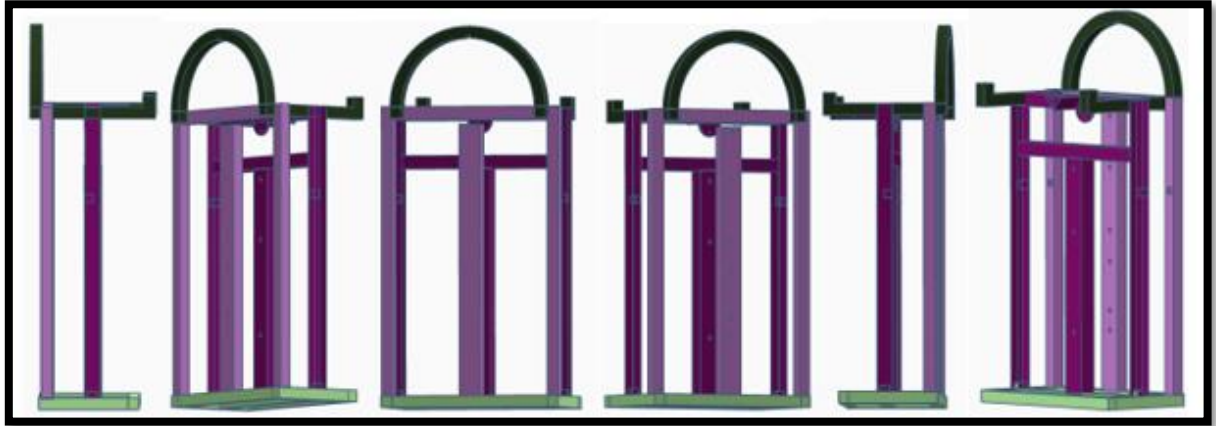


Imagen No. [1]. Estructura para soporte de ejes. Imagen propia.

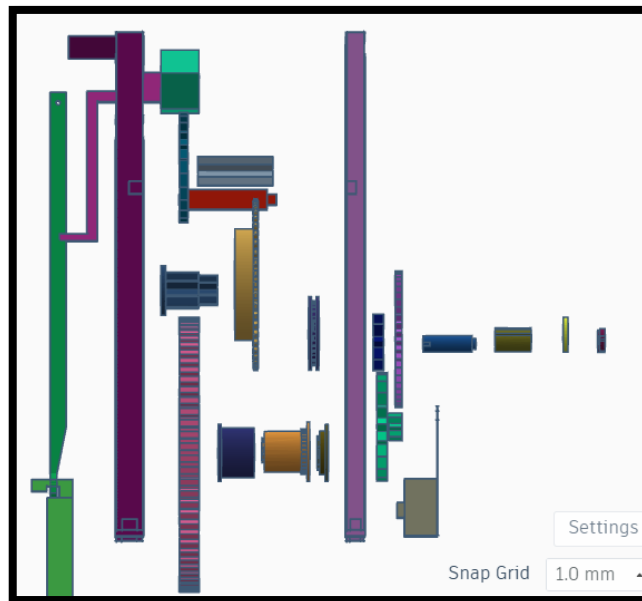


Imagen No. [2]. Despiece de cuerpo del reloj de péndulo con cada uno de los componentes.
Elaborado en Tinkercad. Imagen propia

2. Se conectan las piezas 11 y 12 mediante un eje sobre el marco. Cortamos una tira delgada de plástico flexible de 55 mm de largo. Se perforan orificios en ambos

extremos y se inserta una varilla de madera para fijarla. Esta tira permite que la pieza 13 oscile. (Imagen No. [3]).

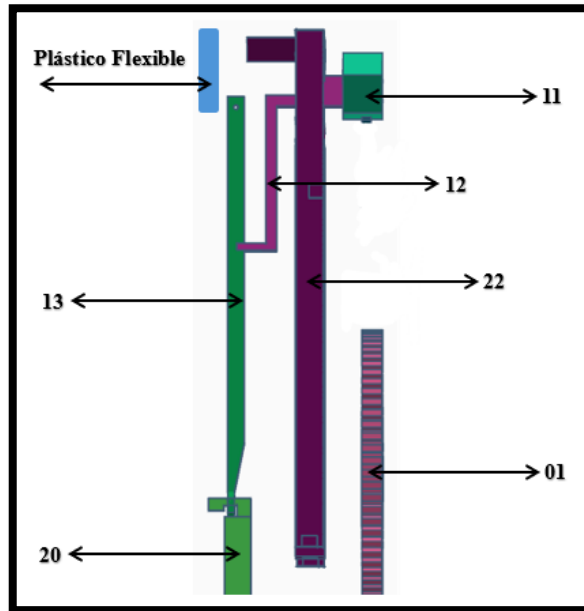


Imagen No. [3]. El plástico flexible cumple la función de las láminas “mejillas” cicloidales.
Imagen propia.

3. Pasamos la pieza 10 a través de la 08 y conectamos al marco mediante un eje. Se hace lo mismo con las piezas 07 y 06. La pieza 08 debe engranar con la 11, y la 06 con la 10. (Imagen No. [4]).

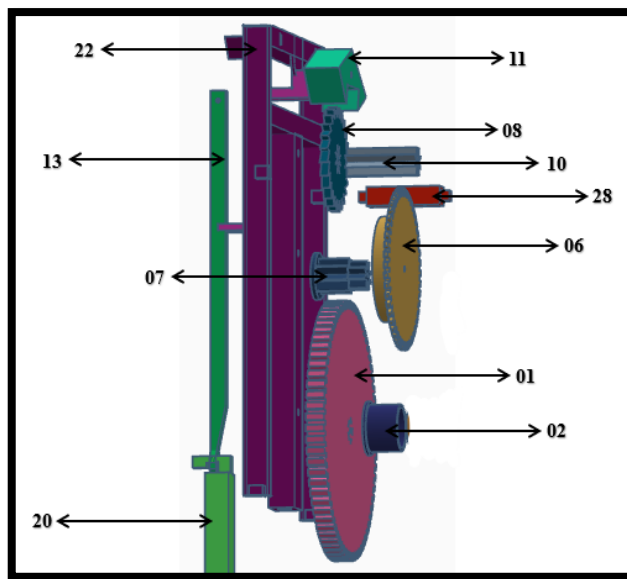


Imagen No.[4]. Ensamble del tren de engranes principal. Imagen propia.

4. Ensamblamos las demás piezas que componen el tren de engranes principal. (Imagen No. [5], [6] y [7]).

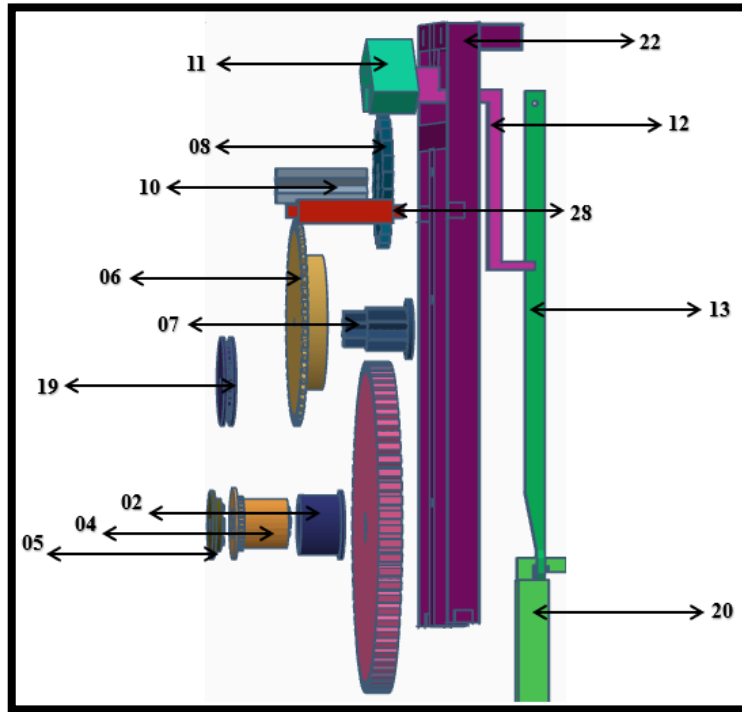


Imagen No. [5]. Ensamble del tren de engranes complementario. Imagen propia.

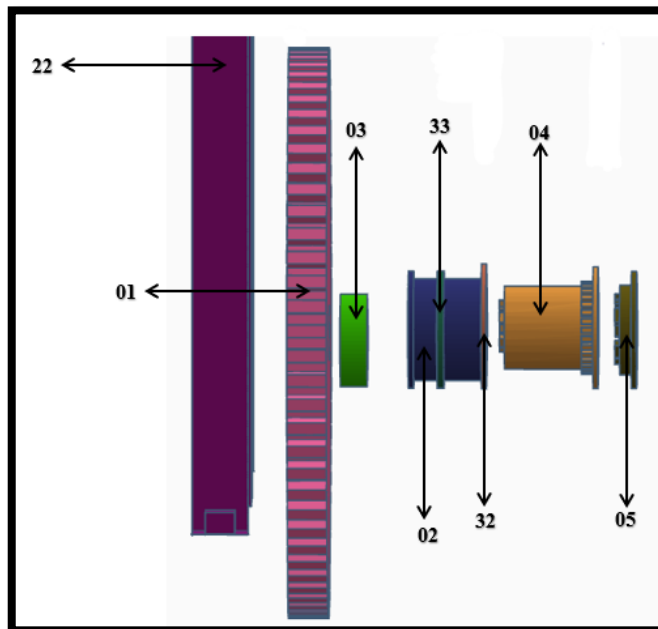


Imagen No. [6]. Ensamble de cada pieza sujeta al piñón principal “pieza No. 01”. Imagen propia.

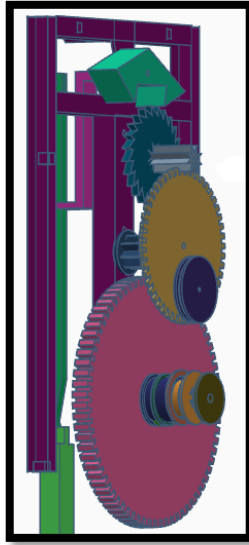


Imagen No. [7]. Imagen de referencia del ensamble del tren de engrane principal. Imagen propia.

5. Ensamblamos las demás piezas que componen el tren de engranes secundario. (Imagen No. [8]).

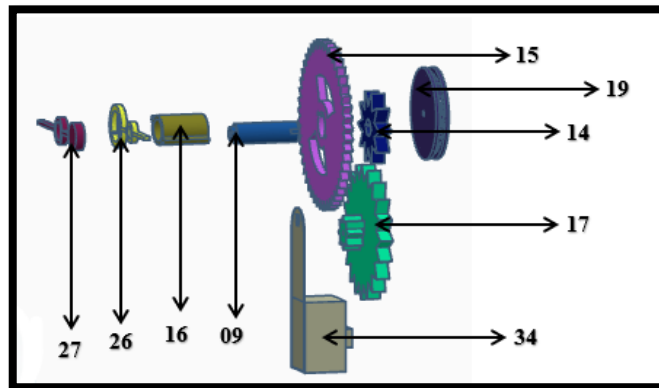
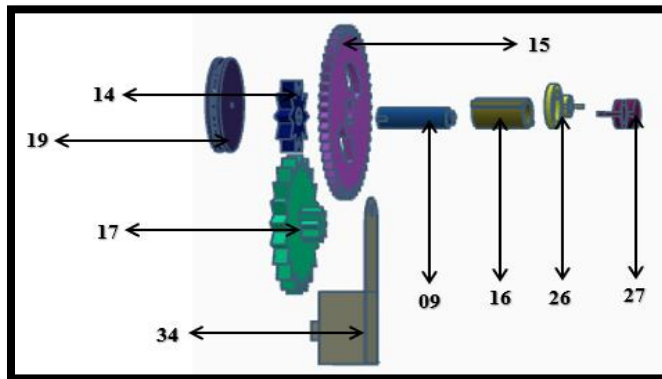


Imagen No. [8]. Despiece de tren de engrane secundario. Imagen propia.

6. Se inserta la pieza 09 dentro de la 14 y aseguramos de que la pieza 19 gire solidariamente con las piezas 14 y 09 en proporción 1: 1. Se debe pasar la pieza 16 a través de la 15 y colocarla sobre la 09, asegurando de que giren independientemente una de la otra. Luego se coloca la manecilla de las horas y después la del minuterero. (Imagen No. [9]).

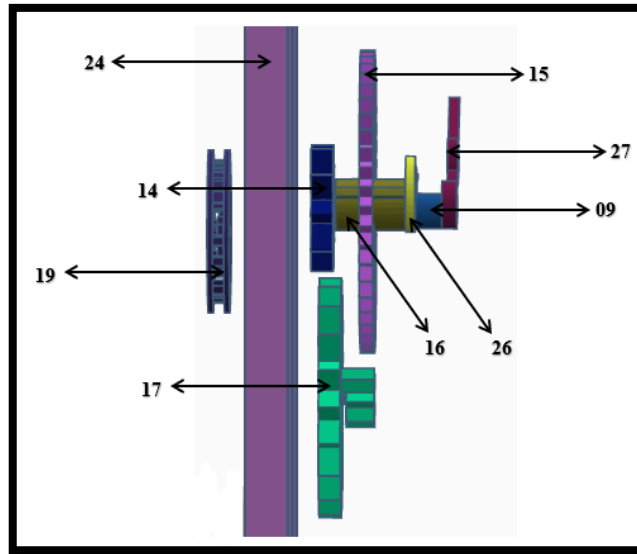


Imagen No. [9]. Ensamblaje del tren de engranes secundario. Imagen propia.

7. Se conecta la pieza 19 con la pieza 05 mediante un eje que atraviesa el marco frontal (pieza 24). Se ata una banda elástica entre estas dos piezas tipo polea. Se debe asegurar que el eje que conecta la pieza 19 esté lo suficientemente pegado con robustes para que, al girarla, el eje también gire en una relación 1: 1. (Imagen No. [10]).

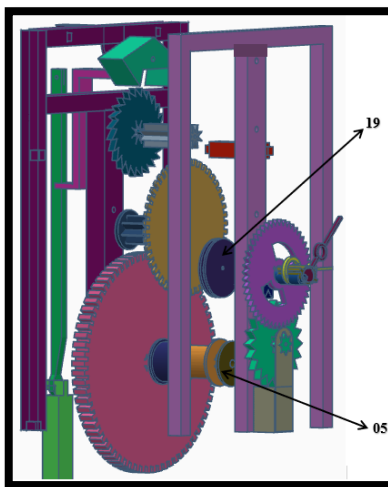


Imagen No. [10]. Tren de engranes principal y secundario del reloj de péndulo. Imagen propia.

8. Se conecta la pieza 17 con un eje sujetado por la pieza 34 y el marco frontal (pieza 24). La pieza 17 debe engranar con la 14 y hacer girar la 15 para mover la aguja horaria. (Imagen No. [11]).

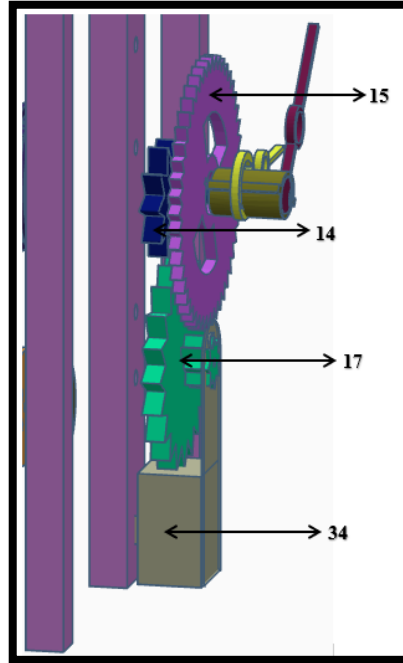


Imagen No. [11].. Imagen propia.

9. Se utiliza la percha (pieza 25) para colgar el mecanismo. (Imagen No. [12]).

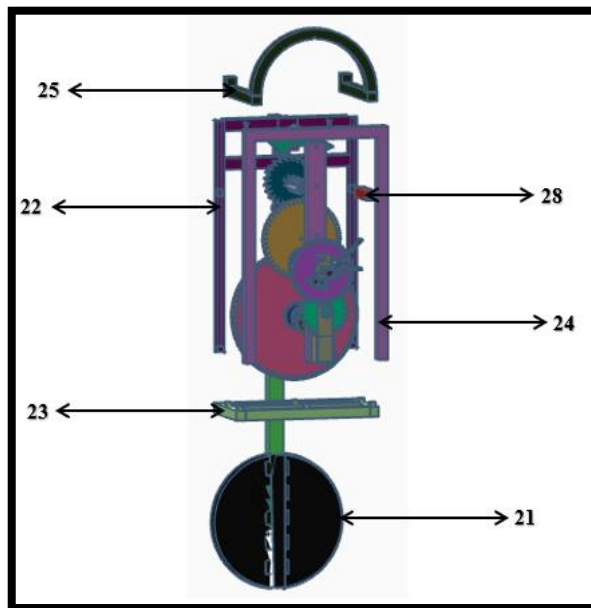


Imagen No. [12]. Estructura del reloj de péndulo con sus componentes. Imagen propia.

10. Finalmente, se utilizan las piezas 20 y 21 para hacer que la rueda de escape produzca un sonido de *tic-tac* a intervalos de 1 [segundo]. Dependiendo del lugar geográfico en donde este ubicado se utiliza el péndulo con la altura necesaria para afinar la oscilación de la pieza 21. (Imagen No. [13]).

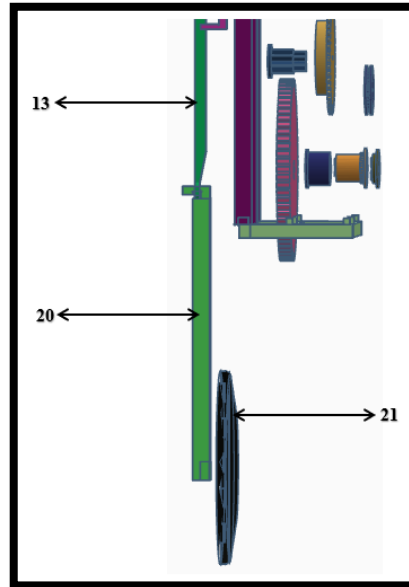


Imagen No. [13]. Péndulo. Imagen propia.

11. Se enrolla un hilo de pescar a la pieza 19, la longitud de la cuerda debe ser de 1,50 [cm], se le amarra un objeto pesado (idealmente metálico), y luego se impulsa el péndulo para iniciar el movimiento del reloj.



Imagen No. [14]. Montaje modelo 3D del reloj de péndulo con cada uno de sus componentes. Imagen propia.