

Capítulo IV

“Por sorprendente que pueda parecer esta hipótesis a primera vista, tendríamos que admitir que por ningún concepto es rebuscada, tan pronto como asumimos que las fuerzas moleculares también son transmitidas a través del éter, tal como lo hacen las fuerzas eléctricas y magnéticas, de las cuales sí podemos hacer actualmente esta afirmación. Si ellas son transmitidas de esta manera, la traslación afectará muy probablemente la acción entre dos moléculas o átomos de una manera semejante a la atracción o repulsión entre partículas cargadas. Ahora bien, ya que la forma y dimensiones de un cuerpo sólido están finalmente condicionadas por la intensidad de las acciones moleculares, no puede dejar de ocurrir, también, un cambio de dimensiones...”

H. A. Lorentz, comentando el experimento de Michelson en su publicación de 1895 “Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern”

RELOJES Y VARILLAS EN MOVIMIENTO.

En este capítulo analizaremos la dilatación de tiempos y la contracción de longitudes, que resultan inseparables de la Relatividad Especial.

La primera parte está destinada a introducir sólo los conceptos. La intención de dicha sección es la de lograr que el lector acepte, cualitativamente, los fenómenos relativistas. Con este fin se emplea un modelo que justifica los cambios de lecturas en tiempos y longitudes, entre sistemas en movimiento relativo.

La segunda parte pretende familiarizar al lector con los esquemas y ecuaciones que se presentan en los textos clásicos de Relatividad Especial y en los próximos capítulos de este libro. Para ello se emplean las Transformadas de Lorentz, que son el corazón “analítico” de dicha teoría.

¿POR QUÉ ATRASAN LOS RELOJES EN MOVIMIENTO?

La experiencia me ha demostrado que si una persona rechaza la posibilidad de que los relojes se alteren como resultado de su estado de movimiento, es virtualmente imposible que se sienta a gusto con los desarrollos de Einstein.

He escuchado numerosas variantes de expresiones como las siguientes:

- “No puede ser que un reloj atrase sólo por moverlo a determinada velocidad”.
- “No es posible que los relojes mecánicos, electrónicos y biológicos se alteren de la misma forma por culpa del movimiento”.

De modo que, en este apartado, mis principales objetivos son los de dar una explica-

ción consistente para justificar el atraso de algún tipo de reloj en movimiento y, luego, generalizar la situación para cualquier ritmo que pueda equipararse a un reloj.

Relojes y Mecanismos

Todo reloj tiene algún tipo de mecanismo que lo hace funcionar. En algunos casos, el mecanismo es simple y evidente. En otros, como ocurre en los relojes biológicos, el mecanismo es muy complejo.

***Nota:** En este capítulo, como en todo el conjunto de esta obra considero como “reloj” a cualquier sistema con movimientos periódicos realizados a ritmo constante. Como ya he mencionado, la Relatividad Especial no se aplica sólo a relojes que marquen horas, minutos y segundos, sino a todos los eventos que deriven de interacciones físicas.*

Empecemos, entonces, con un “reloj” de mecanismo muy simple.

Estimo que a casi todas las personas les debe haber pasado algo parecido a lo que me ocurrió cuando me enfrenté, por primera vez, a una escalera mecánica. Luego de subir y bajar varias veces experimenté el deseo de recorrerla en sentido contrario a su movimiento.

Quienes lo hemos hecho sabemos que esta acción produce una sensación especial.

En particular resulta entretenido igualar nuestra velocidad con la propia de la cinta de transporte. De esta forma se tiene la extraña sensación de caminar sin avanzar.

Por otro lado, si caminamos en el sentido de avance de la cinta, la sensación es de plenitud pues con poco esfuerzo parece que somos capaces de desarrollar velocidades que, en circunstancias normales, requieren mucho más esfuerzo físico.

Imaginemos, entonces, que hacemos la experiencia de caminar por una acera móvil de 15 metros de longitud, completando un recorrido de ida y vuelta, tanto con la acera detenida, como cuando está en movimiento.

Con la acera detenida

En este caso tenemos que recorrer una distancia de 15 m a la ida y otros tantos a la vuelta. Si caminamos a razón de de 1 m/s, el recorrido nos insume 30 segundos.

Para medir el tiempo empleamos el reloj de pulsera que usamos cotidianamente.

Con la acera en movimiento

Si hacemos la experiencia con la acera trasladándose a 0.5 m/s, la situación resulta algo diferente.

- En el trayecto “a favor” del movimiento, la velocidad de avance es de 1.5 m/s De este modo, el recorrido de los 15 metros de “ida” consume sólo 10 segundos.
- En el trayecto “en contra” del movimiento, la velocidad de avance es de 0.5 m/s Por esta razón, el tiempo insumido para recorrer los 15 metros de “vuelta” es de 30 segundos.

Como puede apreciarse con ayuda del cálculo numérico, el tiempo empleado en hacer el trayecto de ida y vuelta con la acera en movimiento ($10\text{ s} + 30\text{ s} = 40\text{ s}$)

es mayor que con la acera en reposo ($15s + 15 s = 30 s$)

La explicación de este fenómeno radica en que el tiempo que se “gana” en la ida, no compensa el tiempo que se “pierde” en la vuelta. En un caso extremo, si nuestra velocidad al andar fuera la misma que mantiene la acera móvil, nunca podríamos completar el trayecto de vuelta.

Un reloj que atrasa

Si el conjunto formado por el hombre y la acera móvil, fuera el mecanismo interno de un reloj, en el que cada “Tic” se produce al completar el viaje de ida y vuelta por la acera, tendríamos de un reloj que atrasa cuando se pone en movimiento.

Un reloj que no atrasa

Por otro lado, dimos por sentado que el reloj de pulsera no se altera por la puesta en marcha de la acera. Este reloj, no afectado por el mecanismo móvil, no tiene motivos para alterar su marcha durante la experiencia.

Conclusiones

Con el ejemplo analizado en mente, es posible sacar las siguientes conclusiones generales:

- Es aceptable que un reloj altere su marcha, por culpa del movimiento, siempre y cuando las piezas en movimiento estén ligadas íntimamente al mecanismo del reloj.
- Para que un reloj no se vea afectado por el movimiento, es preciso que su funcionamiento sea independiente del mecanismo que da lugar al movimiento.

Y estas generalizaciones, aunque triviales, nos permiten obtener una primera conclusión respecto a la Relatividad Especial.

Dado que, conforme a la Relatividad Especial, todos los relojes en movimiento relativo alteran su marcha en la misma proporción, es necesario que exista un mecanismo subyacente, común a todos los relojes o procesos rítmicos del Universo.

O, expresado en otros términos, para que las deducciones de Einstein, realizadas sobre la base de relojes y reglas de medición, afecten todo el comportamiento del mundo físico, es necesario que exista un mecanismo común que afecte tanto a los relojes como a cualquier otra interacción física.

¿POR QUÉ SE ALTERAN LAS LONGITUDES?

Como acabamos de ver, la alteración de relojes, por culpa de un mecanismo subyacente, es un proceso más o menos sencillo de racionalizar.

Sin embargo, la alteración de longitudes, para los sistemas móviles, aunque íntimamente ligada al funcionamiento de los relojes, es algo más difícil de aceptar.

Para resumir este fenómeno en pocas palabras, es suficiente analizar una situación que, por ser demasiado obvia, no suele mencionarse:

Para medir la longitud de una varilla en movimiento es necesario suponer que

somos capaces de medir la ubicación de sus dos extremos simultáneamente.

Si midiéramos la ubicación de un extremo de la varilla móvil en un dado instante y la ubicación del otro extremo en un momento diferente, como la varilla está desplazándose, obtendríamos una lectura falsa de su longitud.

Pero... la definición de un mismo instante en posiciones apartadas, necesita de relojes sincronizados. De otra forma no es posible garantizar que estamos midiendo la ubicación de ambos extremos “en el mismo momento”.

De modo que, si los sistemas móviles mantienen un sincronismo diferente al que emplean los relojes estacionarios, resulta imposible que los observadores de ambos sistemas se pongan de acuerdo con respecto a la longitud de varillas que pertenecen a uno u otro de los sistemas.

En consecuencia, se puede apreciar que, debido a la falta de sincronismo absoluto (derivada de la falta de simultaneidad absoluta), los observadores de cada sistema creen que los observadores del otro sistema realizan sus mediciones en forma errónea.

En los próximos capítulos comprobaremos que el problema lo origina el sistema móvil por su aparentemente “caprichosa” manera de sincronizar los relojes. Pero también veremos que el problema se complica aún más al tratar de identificar el sistema móvil.

EL LÍO DE LOS RELOJES

Llegó el momento de poner la Relatividad Especial en ecuaciones y gráficos. A partir de este punto es necesario que el lector se sienta cómodo con los esquemas que muestran distancias y relojes, en sistemas sometidos a condiciones inerciales con movimiento relativo.

Pero, tal como indique en la introducción de esta obra, éste no es un libro de texto convencional. Por lo tanto, así como todavía no hice ninguna mención al experimento de Michelson, tampoco haré, en este capítulo, una deducción formal de las transformadas de Lorentz.

Ambos desarrollos se presentan regularmente en los libros de Física que abordan la relatividad.

Para los desarrollos presentados en este libro doy por sentado que:

- Las experiencias ordinarias no pueden poner de manifiesto el movimiento absoluto.
- Las transformadas de Lorentz describen correctamente el comportamiento del mundo físico.

El objetivo de este libro no es el de comprobar estas afirmaciones (para cuyo respaldo recurro a los más de 100 años en que se vienen realizando incontables experiencias que las confirman). Mi objetivo es el de tratar de demostrar **por qué** estas afirmaciones son válidas.

De acuerdo con su subtítulo, esta obra está dirigida a quienes ya pasaron por el proceso de lectura de textos clásicos de relatividad y, por lo tanto, conocen las experiencias que le dan sustento y están familiarizados con las consecuencias de los planteos de Einstein.

Nota: Para quienes opinen que aceptar las dos expresiones indicadas, constituye una falta de análisis crítico, puedo comentar que alguna vez diseñé y lleve a la práctica (con la necesaria ayuda de expertos en óptica, que me trataron muy indulgentemente) una variante del experimento de Michelson, empleando un rayo de luz viajando por dos medios diferentes.

El resultado fue categórico. ☺

Las transformadas de Lorentz adoptan la siguiente formulación:

- $t' = (t - vx/c^2)/K$
- $x' = (x - vt)/K$
- $y' = y$
- $z' = z$.
- Donde $K = (1 - v^2/c^2)^{0.5}$.

En estas ecuaciones se describe la relación entre las lecturas de longitudes y tiempos que realizan los observadores en su propio sistema inercial (x, y, z, t) y los valores (x', y', z', t') que se miden en otro sistema inercial que se mueve, con respecto a ellos, a velocidad v .

La Fig. IV-1 muestra la ubicación y relación entre estas variables entre el sistema "estacionario" A y el sistema "móvil" B.

Ambos sistemas están representados por ejes de coordenadas cartesianas,

Las transformadas de Lorentz describen la relación entre las lecturas de relojes y coordenadas de ambos sistemas, asumiendo que ambos orígenes (o y o') estaban enfrentados cuando sus respectivos relojes marcaban el origen de las lecturas de tiempo ($t = t' = 0$ cuando $x = x' = 0$)

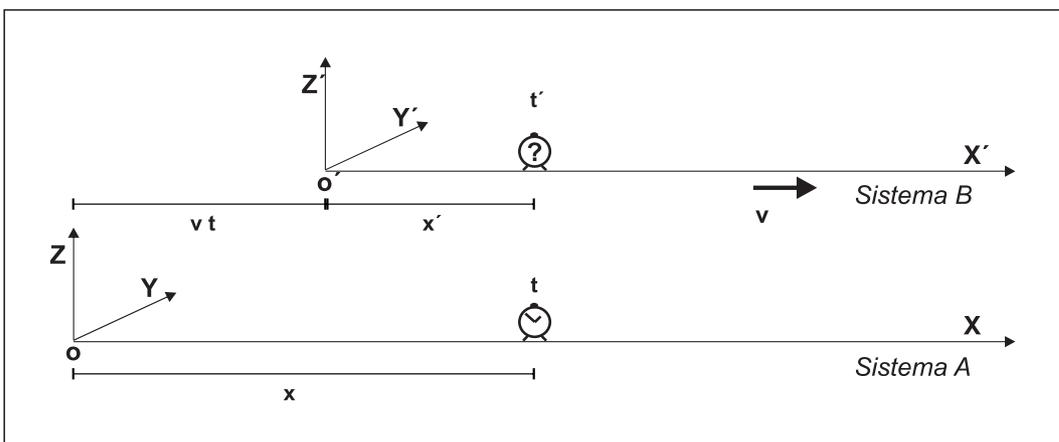


Fig. IV-1: Relaciones de coordenadas espaciales y temporales entre ejes en movimiento relativo.

Ejemplo Numérico

En este apartado haremos algunos cálculos empleando las Transformadas de Lorentz y, aunque para este ejemplo se emplean valores arbitrarios de velocidad y distancias para facilitar las cuentas y el seguimiento del análisis, las conclusiones alcanzadas son de validez general.

Asumimos que los sistemas **A** y **B** de la Fig. IV-1 se desplazan con velocidad relativa $v = 0.866 c$.

Como puede verificarse mediante las cuentas correspondientes, con esta velocidad relativa el coeficiente de Lorentz (**K**) adopta el valor $K = 0.500$.

Haciendo las cuentas en función de múltiplos de una distancia $L = 1,732,000$ km, y suponiendo que las lecturas en el eje **A** corresponden a $t=10:00:00$, si suponemos que algún reloj del eje **B** coincide con esta lectura, obtenemos la siguiente tabla de valores para otras posiciones relativas.

TABLA IV-1 Lecturas de Tiempo en los Ejes Estacionario y Móvil	
Distancia desde el punto de coincidencia de tiempos	Diferencia de tiempos observada, desde el eje estacionario, en los relojes del eje móvil
+3L	+30 s
-2L	+20 s
-L	+10 s
0	0 s
+L	-10 s
+2L	-20 s
+3L	-30 s

Estos valores se corresponden con las lecturas de los relojes mostradas en la Fig. IV-2.

De acuerdo con esta figura, los observadores del eje **A** están convencidos del perfecto sincronismo de sus relojes, pero observan un des-sincronismo notable en la marcha de los relojes del eje **B**.

Sin embargo, conforme a los postulados de la Relatividad Especial, y dado que las transformadas de Lorentz son igualmente válidas para los dos ejes, los observadores del eje **B**, tiene otra imagen para describir las lecturas de los relojes de ambos ejes.

Para los observadores del eje **B** la situación es la representada en la Fig. IV-3.

Esta situación es la que ha dado en llamarse el "Lío de los Relojes" en la Relatividad Especial.

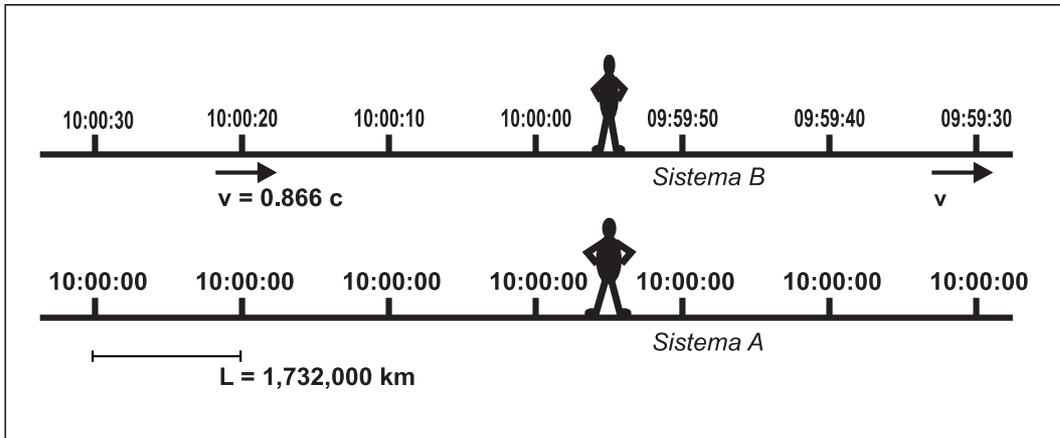


Fig. IV-2: Estado de los relojes en los sistemas A y B, conforme a las observaciones realizadas por observadores del eje A.

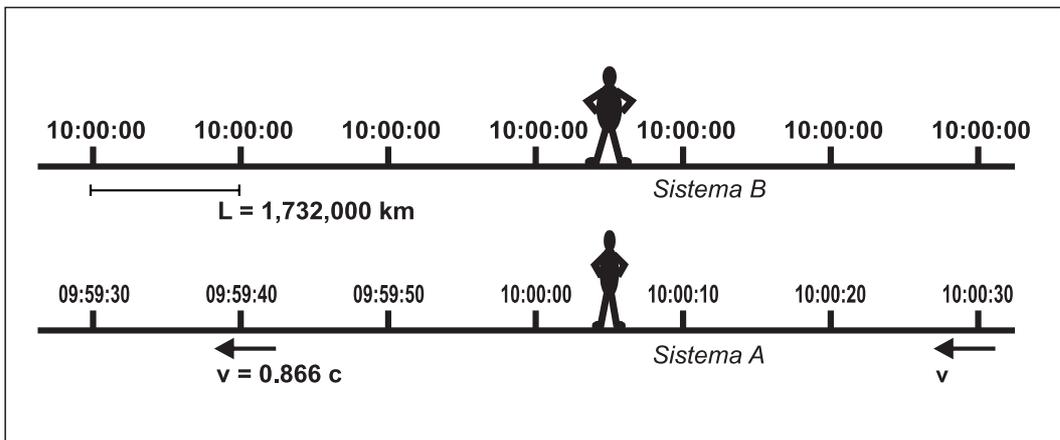


Fig. IV-3: Estado de los relojes en los sistemas A y B, conforme a las apreciaciones realizadas por observadores del eje B.

La Relatividad Especial otorga el mismo grado de validez a las lecturas hechas desde el sistema A o desde el sistema B (equivalencia de los sistemas inerciales para describir el mundo físico). En consecuencia el Lío de los Relojes se acepta como un hecho, derivado de la aplicación de las transformadas de Lorentz. Y estas últimas son la consecuencia directa de los dos postulados relativistas (equivalencia de los sistemas inerciales y constancia de c).

Sin embargo es interesante ampliar la discusión tratando de entender qué significa la incompatibilidad en las lecturas de los relojes entre sistemas en movimiento. Si sólo nos quedamos con este modelo de relojes y lecturas aparentemente caprichosas es probable que consideremos que toda la Relatividad Especial no es más que un conjunto de cosas incomprensibles.

Y ... no es así.

¿POR QUÉ RELOJES?

Pese a que ya fue mencionado, es conveniente volver sobre este punto.

Einstein y los libros sobre Relatividad Especial usan regularmente relojes para ejemplificar la relatividad del tiempo, pero los conceptos involucrados son mucho más profundos. Tal como se presentan regularmente estos desarrollos, el lector desprevenido tiende a creer que es necesaria una especie de “confabulación” de los observadores para obtener los resultados que se muestran.

Para entender que esto no es así, podemos profundizar los análisis realizados.

Aunque al capítulo IX está dedicado por entero a este tema, a esta altura del desarrollo quiero mostrar que los observadores y sus relojes no son más que una manera visual de describir las interacciones del mundo físico, y que el sincronismo desarrollado por Einstein no es otra cosa que el resultado natural de estas interacciones.

Las interacciones entre cuerpos rígidos se producen mediante la aplicación de fuerzas. Y las fuerzas dominantes a nuestra escala son dos:

- La fuerza de Gravedad
- Las fuerzas Electromagnéticas.

En tanto que la gravedad es omnipresente, las fuerzas electromagnéticas describen todas las demás interacciones.

Las fuerzas electromagnéticas son las causantes de:

- Las reacciones químicas.
- Los empujes mecánicos.
- Los colores. Interacción de la luz con la materia.
- El envejecimiento (resultado de reacciones químicas)
- Etc.

Imaginemos, entonces, que empujamos una varilla, en el sentido longitudinal, desde uno de sus extremos.

La varilla adquiere una cierta velocidad final como resultado de nuestro empuje. Pero esta velocidad final depende de la masa de la varilla. Una varilla de 10 m resulta más difícil de poner en movimiento que una varilla de 1 m. Y, si es de hierro, adquiere menos velocidad que si es de madera, para la misma fuerza aplicada.

Pregunta: ¿Por qué tiene importancia la masa de toda la varilla si sólo estamos ejerciendo la fuerza en uno de sus extremos? (*Pregunta tonta*)

Respuesta: Porque estamos empujando toda la varilla. No sólo su extremo.

Pregunta: Y... ¿Cómo se entera toda la varilla de que la estamos empujando? (*Pregunta menos tonta*)

Respuesta: Porque la fuerza se transmite a lo largo de la varilla.

Pregunta: Y... ¿cómo se transmite esa fuerza?

Respuesta: (*La cosa viene molesta*)... A través de las interacciones entre los átomos que componen la varilla. Y me adelanto a la próxima pregunta siendo más específico: A través de las interacciones electromagnéticas entre los electrones externos de los átomos que componen la varilla.

Pregunta: ¿Por qué la mano que empuja percibe toda la masa de la varilla? (*El juego va tomando forma*)

Respuesta: Porque, para mantener la integridad, la información debe realizar un camino de ida y vuelta por la varilla. De otra forma podría empujarse un extremo de la varilla sin que el otro extremo se enterara. Esa situación, natural en sistemas tales como granos de arena dispersos, conduce a la rotura o pérdida de integridad del sistema que está siendo empujado.

Bien!!. Al final de todo este pequeño juego de preguntas y respuestas tenemos lo que necesitábamos:

- Las interacciones físicas implican idas y vueltas de información electromagnética.

Entonces, si las señales se retardan en el camino, es razonable suponer que las interacciones se van a producir a un ritmo más lento. Y esto es exactamente lo que pasa en los sistemas en movimiento. Como ya vimos con la cinta móvil, si las señales tienen un medio soporte estacionario, en los sistemas móviles las interacciones se producen en forma más lenta. Los relojes atrasan no como resultado de caprichosos observadores sino como consecuencia natural de la existencia de un **Marco de Referencia Estacionario (MRE)**.

Pregunta: Pero ..., la Relatividad Especial no acepta la existencia de un **Marco de Referencia Estacionario**. ¿Por qué se produce, entonces, el atraso de los relojes en la Relatividad Especial?

Respuesta: Al no aceptarse la presencia de un **MRE**, en la Relatividad Especial los relojes atrasan sólo en forma aparente. Y al no plantearse un modelo físico que explique el atraso de los relojes, el sincronismo de Einstein, para muchas personas, resulta caprichoso.

Comentario: Es aceptable la marcha más lenta de los relojes móviles cuando existe un sistema de referencia estacionario, pero esta postura no es sostenible pues, tal como demuestra la Relatividad Especial, los observadores del sistema móvil y los del sistema estacionario observan que son los relojes del otro sistema los que atrasan. Si existiera un **MRE** sería fácil detectarlo pues todos los relojes de los sistemas que se mueven con respecto a él atrasarían en forma sistemática.

Respuesta: Por extraño que parezca, la existencia de un **MRE** no resulta en absoluto incompatible con las observaciones mutuas entre ambos ejes. Los ejemplos de los capítulos siguientes ponen de manifiesto este punto.

Por alguna razón, pese a la sugerencia original de Lorentz y Poincaré, desde que se aceptó la teoría de la Relatividad Especial formulada por Einstein, parece ha-

berse considerado superfluo el hecho de que la reciprocidad de las transformadas de Lorentz puede interpretarse de dos formas alternativas.

- Aceptando que todos los sistemas inerciales son realmente equivalentes.
- Verificando que aunque exista un sistema privilegiado (**MRE**) resulta indetectable mediante experiencias cotidianas.

La primera interpretación conduce al estado actual de interpretación (o no interpretación) de las ecuaciones de la Relatividad Especial.

La segunda interpretación es la base de los análisis de esta obra, donde se muestra que la Relatividad Especial es perfectamente compatible con lo que denominamos “sentido común”.

Pregunta: Si las ecuaciones resultan idénticas ¿Es posible dar un ejemplo en que se vea la conveniencia de emplear la segunda interpretación en vez de la primera?

Respuesta: Naturalmente. Como se analiza en los próximos capítulos, la segunda interpretación permite trabajar con sistemas acelerados y con sistemas en rotación uniforme. Estos dos temas son evitados sistemáticamente por los libros de Relatividad Especial pues, en caso de analizarse, mostrarían paradojas insolubles en problemas típicos como la conocida Paradoja de los Gemelos.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

A lo largo de este desarrollo se mostró que es conceptualmente aceptable que los relojes en movimiento alteren su marcha. Para ello es necesario que la estructura del reloj contenga piezas que sean afectadas por el movimiento.

Basados en esta observación trivial es conveniente cambiar la pregunta:

- ¿Cómo es posible que un reloj atrase por el sólo hecho de ponerse en movimiento?

Por estas otras:

- Dado que todos los relojes móviles atrasan ¿Cuál es el mecanismo profundo que afecta la marcha de todos los relojes?
- ¿Por qué la velocidad de la luz interviene en la ecuación que afecta la marcha de todos los relojes en movimiento relativo?

Adicionalmente se introdujeron las transformadas de Lorentz, que permiten cuantificar las relaciones de longitudes y tiempos entre sistemas móviles.

Un ejemplo numérico, calculado mediante las Transformadas de Lorentz, mostró la situación que se describe regularmente como “Lío de los Relojes” en Relatividad Especial.

También se puso en evidencia que, a menos que se logre una interpretación compatible con el sentido común, las consecuencias de las Transformadas de Lorentz brindan resultados que se presentan como caprichosos o fuera de la lógica convencional.