En muy pocas ocaciones un cuerpo recorre **distancias iguales en intervalos iguales de tiempo**, lo cual llamaríamos una **rapidez constante o uniforme.** Si nos pusiéramos a pensar detenidamente en estos resultados, veríamos que realmente son muy poco comunes. Ni los automóviles, ni los aviones o barcos se mueven en línea recta a una rapidez constante y precisa.

4-5 LOS 50 METROS DE RAMÓN Y EL SIGNIFICADO DE LA RAPIDEZ MEDIA.

Al estar observando una carrera de natación, nos emocionamos cuando el competidor de nuestra simpatía va adelante, y más si al finalizar se anuncia su nombre como ganador, o sea, el nadador que hizo el tiempo más corto en recorrer la distancia fijada.

En cualquier competencia de este tipo, digamos los 100 metros nado de dorso, cada nadador debe recorrer la misma distancia. Por lo tanto, el nadador que haga el tiempo menor, será también el que tenga la rapidez promedio más alta al cubrir la distancia. La proporción de la distancia recorrida entre el tiempo transcurrido, nos da la rapidez promedio. Esta relación la expresamos con la siguiente ecuación:

$$\text{rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

¿Qué información podemos obtener del conocimiento de la rapidez promedio? Podemos contestar a esta pregunta estudiando un ejemplo de la vida real.

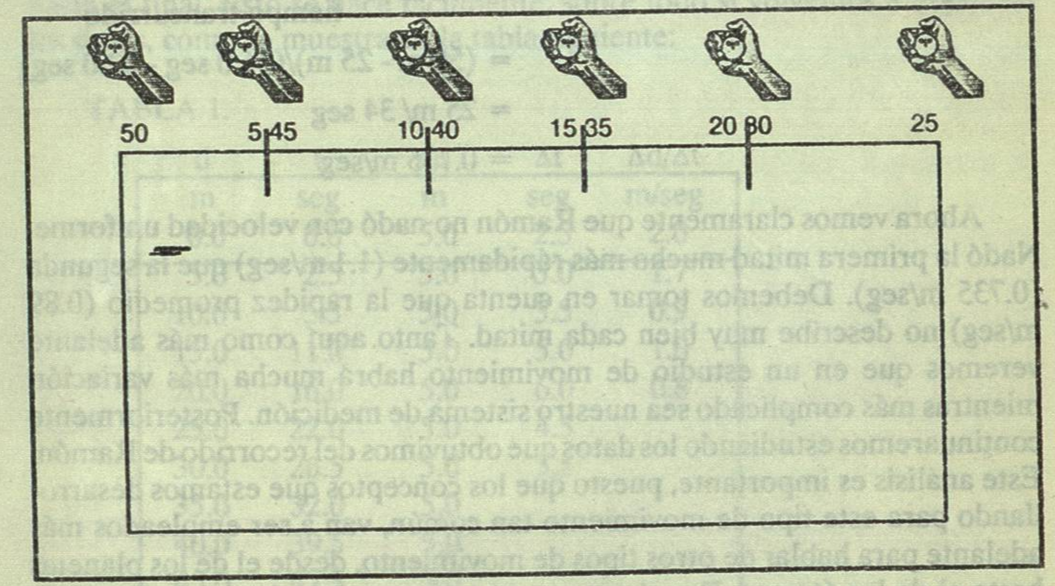
Ramón no es el nadador más rápido del mundo en estilo libre, pero no se necesita una rapidez olímpica para lo que queremos hacer. Si medimos el tiempo que se tardó Ramón en nadar de ida y vuelta en una alberca, la cual mide 25 metros de longitud, vemos que fue de 56.2 segundos. Por lo tanto, su velocidad promedio en la distancia total de 50 metros fue como sigue:

$$50\text{m}/56.2\text{ seg} = 0.89\text{ m/seg}$$

¿Nadó Ramón los 50 metros con una rapidez uniforme o constante? Si no fue así, ¿en cuál de los dos tramos nadó más rápidamente? ¿En cuál la rapidez fue menor? ¿Qué rapidez llevaba cuando pasó los 10 metros, los 18 metros, los 45 metros? Cuando se está entrenando para una competencia, es conveniente saberlo, pero hasta ahora no tenemos modo de contestar ninguna de esas preguntas. La cifra 0.89 m/seg es probablemente la que más se aproxima a la descripción de todo el suceso.

Para comparar la rapidez de Ramón en diferentes partes del recorrido, necesitamos observar los tiempos y las distancias cubiertas.

Colocamos observadores que debían poner a funcionar sus cronómetros cuando se diera la señal de salida, a intervalos de 5 metros desde la marca de salida, a todo lo largo de la alberca. Cada observador tenía dos relojes: detenía uno cuando Ramón pasaba frente a él de ida, haciendo lo mismo con el otro cuando pasaba de regreso. Los datos se tabularon como sigue:



d	t	d	t
0.0	0.0	30.0	26.5
5.0	2.5	35.0	32.0
10.0	5.5	40.0	39.5
15.0	11.0	45.0	47.5
20.0	16.0	50.0	56.2
25.0	22.0		

A partir de estos datos podemos determinar, en forma separada la rapidez promedio de Ramón en los primeros 25 metros y en los últimos.

$$\text{rapidez promedio para los primeros 25 m} = \frac{\text{Distancia recorrida}}{\text{tiempo transcurrido}}$$
$$= 25.0 \text{ m}/22 \text{ seg}$$
$$= 1.1 \text{ m/seg}$$

$$\text{rapidez promedio en los últimos 25 metros} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo trancurrido}}$$
$$= (50 \text{ m} - 25 \text{ m})/(56.0 \text{ seg} - 22.0 \text{ seg})$$
$$= 25 \text{ m}/ 34 \text{ seg}$$
$$= 0.735 \text{ m/seg}$$

Ahora vemos claramente que Ramón no nadó con velocidad uniforme. Nadó la primera mitad mucho más rápidamente (1.1 m/seg) que la segunda (0.735 m/seg). Debemos tomar en cuenta que la rapidez promedio (0.89 m/seg) no describe muy bien cada mitad. Tanto aquí como más adelante veremos que en un estudio de movimiento habrá mucha más variación mientras más complicado sea nuestro sistema de medición. Posteriormente continuaremos estudiando los datos que obtuvimos del recorrido de Ramón. Este análisis es importante, puesto que los conceptos que estamos desarrollando para este tipo de movimiento tan común, van a ser empleados más adelante para hablar de otros tipos de movimiento, desde el de los planetas hasta el de los átomos. Por ahora vamos a mostrar una forma de escritura que simplificara nuestra definición de la rapidez promedio:

$$\text{rapidez promedio} = \frac{\text{distancia Recorrida}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

Una forma más concisa de expresarlo, y que establece exactamente lo mismo, es:

$$v_{pr} = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

En esta ecuación, v_{pr} es el símbolo de la velocidad promedio; Δd es el símbolo del cambio de posición y Δt es el símbolo del intervalo del tiempo transcurrido. el símbolo Δ es la cuarta letra del alfabeto griego (mayúsculas) y se llama **delta.** cuando precede a otro símbolo, significa **"cambio"**. Por lo tanto, Δd *no* significa "multiplicado por d". Por el contrario, significa **"el cambio en d"** o **"el intervalo de la distancia"**. De la misma manera, Δt simboliza **"el cambio en t"** o **"el intervalo de tiempo"**.

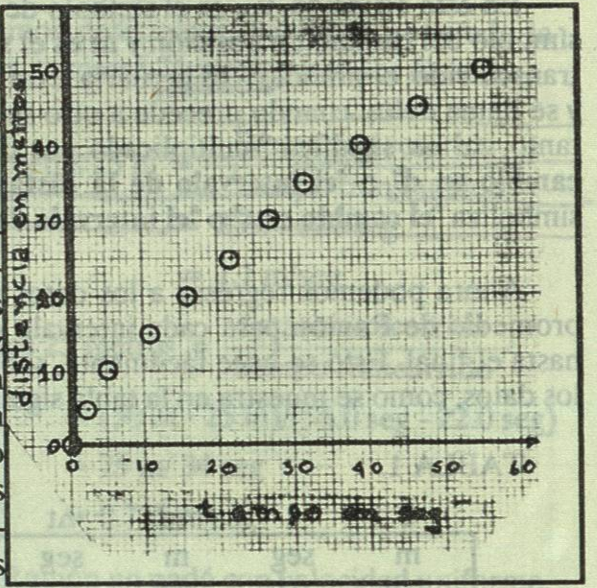
Ahora podemos regresar a los datos anteriores y calcular la rapidez promedio de Ramón para cada intervalo de 5 metros, desde el principio hasta el final. Esto se hace fácilmente, sobre todo si volvemos a organizar los datos, como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA 1.

d	t	Δd	Δt	Δd/Δt
m	seg	m	seg	m/seg
0.0	0.0	5.0	2.5	2.0
5.0	2.5	5.0	3.0	1.7
10.0	5.5	5.0	5.5	0.9
15.0	11.0	5.0	5.0	1.0
20.0	16.0	5.0	6.0	0.8
25.0	22.0	5.0	4.5	
30.0	26.5	5.0	5.5	
35.0	32.0	5.0		
40.0	39.5	5.0		
45.0	47.5	5.0		
50.0	56.0			

Los valores de v_{pr} calculados a intervalos de 5 metros para la primera vuelta, están calculados en la columna de la derecha. Faltan los valores de la segunda vuelta para que ustedes los calculen.

Hay muchos detalles que podemos ver en la tabla. Si observamos la columna de la rapidez, veremos que, como era de esperarse, la rapidez de Ramón fue mayor al iniciar el recorrido. Su salto de arranque en el agua le dio más rapidez; en la mitad de la primera vuelta nadó a un ritmo bastante regular, disminuyendo su rapidez al llegar a los primeros 25 metros. Utiliza tus propias cifras para ver qué pasó en los últimos 25 metros.



Aunque hemos determinado la rapidez en varios intervalos del recorrido, seguimos considerando la rapidez *promedio*. Los intervalos son más pequeños (5 metros en lugar de 50 metros), pero todavía no sabemos los detalles de lo que pasó dentro de los intervalos de 5 metros. Sabemos que la rapidez promedio entre los 15 metros y los 20 metros fue de 1.0 m/seg, poro aun no sabemos cómo calcular la rapidez en el preciso instante en que estaba, digamos, en los 18 ó 20 metros. Aun así, el cálculo del intervalo de 5 metros entre los 15 y los 20 metros es más exacto que el del promedio del total de los 50 metros, o de las mitades, o sea de 25 metros. Luego volveremos a ver el problema para determinar la "rapidez en un determinado instante y lugar".

Frecuentemente se usan los términos **velocidad y rapidez** como sinónimos, sin embargo, en sentido estricto la **rapidez es una cantidad escalar** y la velocidad es una **cantidad vectorial.**

La cantidad vectorial tiene magnitud, dirección y sentido, mientras que la **cantidad escalar** solo tiene **magnitud**. Por lo tanto, la **rapidez** es un término aplicado a la magnitud de la **velocidad** y no especifica la dirección del movimiento.

La rapidez y la velocidad de un cuerpo, al moverse a lo largo de una línea recta, tienen el mismo valor numérico. Pero, si la rapidez a lo largo de una trayectoria curva es constante, su velocidad no se considera igual porque cambia de dirección.

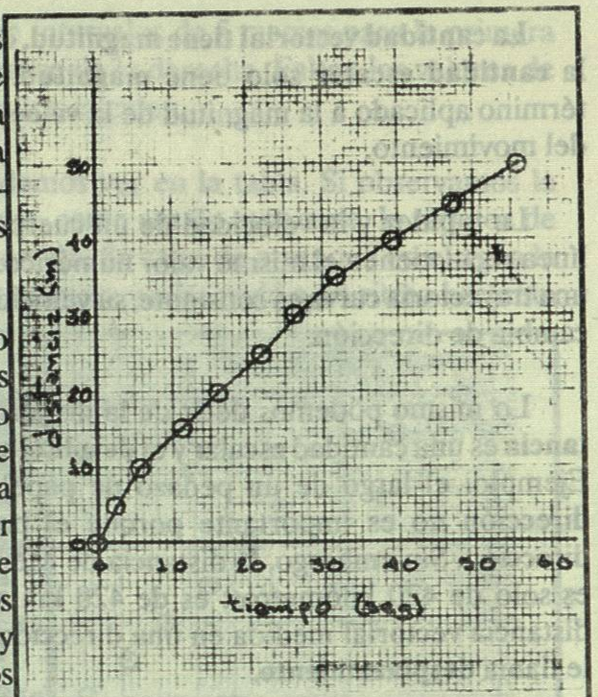
Lo mismo podemos decir de la distancia y el desplazamiento. La **distancia** es una cantidad escalar y el **desplazamiento** es una cantidad vectorial. Ejemplo: el largo de un pedazo de papel puede ser de 20 cm, pero la dirección no es importante porque el papel puede estar en cualquier dirección. Sin embargo, la distancia de México, D. F. a Acapulco, Gro., no es solo de 420 kilómetros: es de 420 km en dirección Norte-Sur. A una distancia vectorial medida en una dirección particular entre dos puntos se le llama **desplazamiento.**

4-6 GRÁFICAS DEL MOVIMIENTO Y COMO ENCONTRAR LA PENDIENTE.

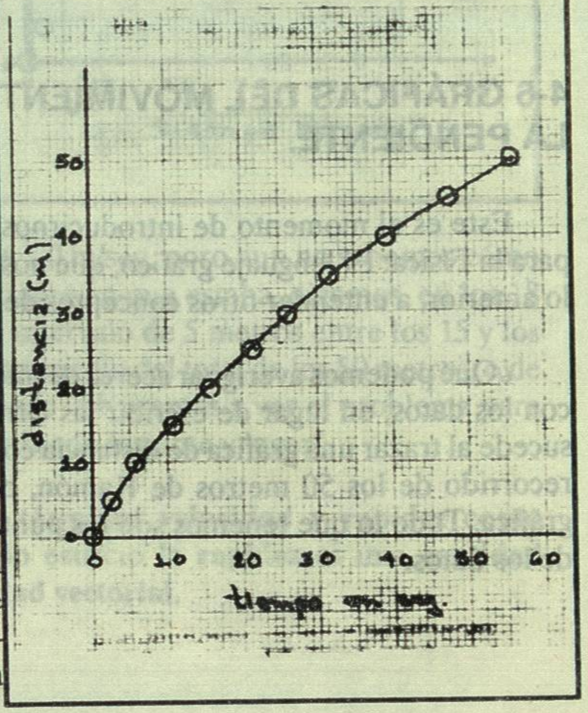
Este es el momento de introducirnos en un lenguaje de gran utilidad para la Física: El lenguaje gráfico, que nos puede conducir, combinado con lo anterior, a entender otros conceptos de la misma física.

¿Qué podemos averiguar acerca del movimiento, si hacemos una gráfica con los datos, en lugar de escribir las cifras en una tabla? Veamos lo que sucede al trazar una gráfica de distancia contra tiempo, usando los datos del recorrido de los 50 metros de Ramón, como se muestra en la siguiente gráfica. Todo lo que tenemos son los puntos que corresponden a cada uno de los datos:

Cada punto de la gráfico nos muestra el momento en que Ramón llegó a una determinada posición en su recorrido. en la siguiente gráfica hemos dibujado líneas rectas punteadas entre cada uno de los puntos.



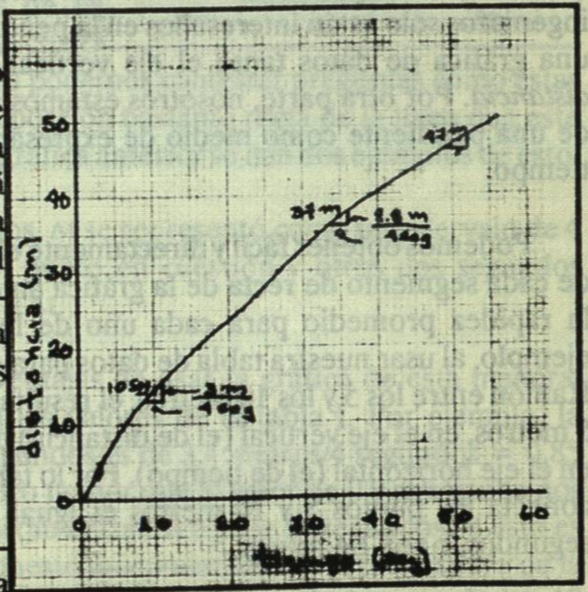
De los datos obtenidos, no sabemos cuáles fueron los valores intermedios, por lo tanto, las conexiones mediante líneas rectas son tan solo una forma muy simple de sugerir cómo se vería la gráfica total: de hecho, las líneas rectas no nos van a dar una aproximación muy buena, porque indican cambios muy bruscos en la rapidez. Si creemos que Ramón modificó su rapidez en forma gradual, podemos obtener una aproximación mejor dibujando a través de los puntos una curva lo más suave posible. Uno de los ejemplos que podemos tener de una curva suave se muestra en la gráfica siguiente:



"Leemos" esta última gráfica. Se nota que la línea está más inclinada al principio. Esto quiere decir que durante los primeros segundos ocurrió un cambio de posición bastante grande. En otras palabras, Ramón empezó muy rápido, y la

inclinación de la línea nos indica qué tan rápido. De los 10 a los 20 metros la línea aparece bastante recta y no se inclina para ningún lado, lo que quiere decir que su rapidez fue constante en ese tramo. Al leer la gráfica más detalladamente, vemos que su rapidez disminuyó considerablemente hasta antes de llegar a los 25 metros, pero la aumentó justo después de la vuelta. La inclinación disminuye gradualmente desde los 30 metros hasta el final, lo cual nos indica que Ramón cada vez iba más lento. En los últimos 5 metros no hubo ningún esfuerzo final.

Visto de esta manera, la gráfica nos proporciona una representación visual del movimiento con solo echarle un vistazo. Pero este tipo de representación no nos ayuda si queremos saber los valores reales de la rapidez de Ramón en varios momentos diferentes. Para esto necesitamos medir la inclinación de la línea. Aquí tenemos que pedirle ayuda a las matemáticas, lo que haremos con mucha frecuencia.



Existe en geometría un viejo método de solucionar este problema. La inclinación de una gráfica en cualquier punto está relacionada con el cambio en la dirección vertical (Δy) y con el cambio en la dirección horizontal (Δx). Por definición, la proporción de estos cambios ($\Delta y/\Delta x$) es la pendiente.

$$\text{pendiente} = \Delta y/\Delta x$$

La pendiente es un concepto matemático que se usa frecuentemente, por ejemplo, para indicar la inclinación de una línea en cualquier gráfica. en una gráfica de distancia y tiempo, como la que usamos para el recorrido de Ramón, la posición o distancia del punto de partida generalmente se coloca en el eje vertical (la "d" está en lugar de la "y") y el tiempo en el eje horizontal (la "t" reemplaza a la "x"). Por lo tanto, en una gráfica como ésta, la pendiente de una línea recta nos la da:

$$\text{pendiente} = \Delta d/\Delta t$$

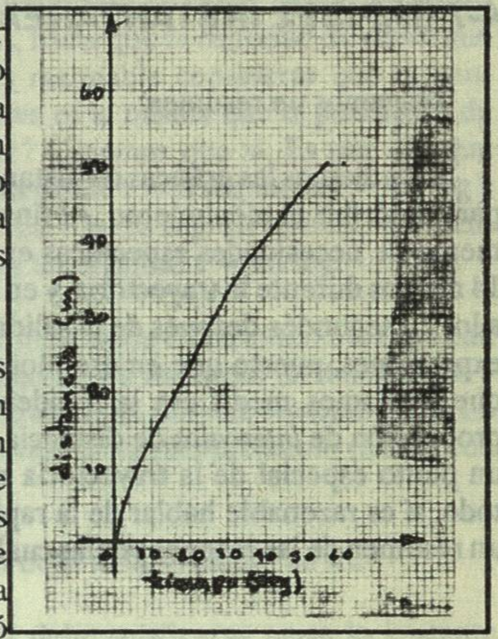
Esto nos recuerda la definición de la rapidez promedio: $v_{pr} = \Delta d/\Delta t$. De hecho, numéricamente v_{pr} es igual a la pendiente. En otras palabras, la pendiente de cualquier segmento de recta en una gráfica de distancia contra tiempo nos da una medida de la rapidez promedio del objeto durante el intervalo.

Cuando medimos la pendiente en una gráfica, básicamente estamos haciendo lo mismo que hacen los ingenieros que construyen carreteras cuando especifican la inclinación del camino. Simplemente miden cuánto se eleva éste, y dividen esa cifra entre la distancia horizontal que uno debe recorrer para llegar a esa elevación. La única diferencia consiste en que los ingenieros solo están interesados en la pendiente física real. Por lo tanto, en una gráfica de datos tanto el eje vertical como el horizontal mostrarán *distancia*. Por otra parte, nosotros estamos usando el *concepto matemático* de una pendiente como medio de expresar la *distancia* comparada con el tiempo.

Podemos obtener fácil y directamente el valor numérico de la pendiente de cada segmento de recta de la gráfica anterior. Esto nos dará el valor de la rapidez promedio para cada uno de los intervalos de 5 metros. Por ejemplo, al usar nuestra tabla de datos para calcular la rapidez promedio de Ramón entre los 5 y los 10 metros, el resultado fue de 1.4 m/seg. El recorrió 5 metros, en el eje vertical (el de distancia) durante un lapso de 3.5 segundo en el eje horizontal (el de tiempo). Por lo tanto, la pendiente de la línea que conecta los puntos 5 y 10 metros es igual a 5 metros divididos entre 3.5 segundos, o sea 1.4 m/seg.

La pendiente, tal y como la hemos descrito aquí, no es lo mismo que la inclinación que muestra la línea sobr el papel milimétrico. Supongamos que se hubiera escogido una escala diferente para los ejes de distancia o de tiempo, haciendo la gráfica dos veces más alta o más ancha. En ese caso, la aparente inclinación de la gráfica en su totalidad sería diferente; sin embar-

go, la verdadera pendiente se mide por la proporción de las unidades de tiempo y distancia. Una Δd de 10 metros en una Δt de 5 segundo nos da una proporción de 2 m/seg, sin importar cuánto espacio hayamos usado en el dibujo o una gráfica para representar los metros y los segundo.



De hecho, la gráfica es mucho más que una simple "representación pictórica" de los valores de la tabla. Con ella podemos contestar preguntas que no podíamos sacar de los datos originales: Cuál fue la velocidad de Ramón, 10 segundos después de la salida? Qué tan rápido iba cuando cruzó la marca de los 37 metros? Ahora podemos contestar preguntas como éstas obteniendo la pendiente de una porción bastante recta de la línea que esté cerca del punto de interés. En la gráfica anterior se dan dos ejemplos de esto.

Para cada uno de los ejemplos, Δt se representó como un intervalo de 4 segundos, 2 segundos antes del punto en cuestión y otros dos segundos después. Entonces medimos Δd y Δt.

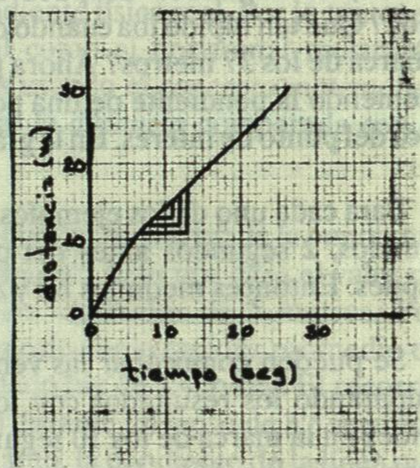
Se pueden comprobar las ventajas de usar la gráfica de esta manera, comparando los resultados con los valores de la tabla I. Por ejemplo, la rapidez en la marca de los 10 segundos es de 3.4 metros/4 segundos = 0.85 m/seg, según la gráfica. Es un poco menor que el valor de 0.9 m/seg que nos da la tabla para la rapidez promedio entre los 6 y los 11 segundos. Y esto es justamente lo que se esperaba, puesto que podemos ver la curva suave de la gráfica en realidad se vuelve menos inclinada cerca de l punto de los 10 segundos. Si esta curva suave realmente describe mejor la forma en que nadó Ramón, que la gráfica de la línea recta, entonces podemos decir que obtuvimos más información de la gráfica que de los que pusimos en ella.

4-7 RAPIDEZ INSTANTÁNEA.

Hagamos un resumen:

Estudiamos las gráficas de distancia y tiempo que pueden ser más útiles para describir el movimiento. Al final de la parte anterior hablamos brevemente de necesidades específicas en puntos especiales, como la marca de 14 metros durante la trayectoria, y en instantes particulares de tiempo como a los 10 segundos después de la salida. Quizas nos molestaron un poco esas expresiones, puesto que en ese momento admitimos que la única rapidez que podíamos medir era la rapidez *promedio*, en la que necesitamos la proporción de *intervalos* de distancia a *intervalos* de tiempo y, sin embargo, un punto especial de la trayectoria no tiene ningún intervalo. A pesar de todo, sí es razonable hablar de la rapidez en un punto. Enseguida haremos un resumen de las razones por las cuales usamos la "rapidez" en este sentido:

Recordarán que nuestra respuesta a la pregunta ¿Qué tan rápido iba Ramón en el momento de t = 10 segundos?, fue de 0.85 m/seg. Logramos esta respuesta obteniendo la pendiente de una pequeña porción de la curva cerca del punto en que "t" es igual a 10 segundos. La sección de la curva que usamos aparece a continuación:



Notarán que la parte de la curva que usamos parece ser casi una línea recta. Como lo muestra la tabla siguiente, el valor de cada intervalo de la pendiente varía muy poco cuando disminuimos el intervalo de tiempo Δt:

Δt seg	Δd m	Δd/Δt m/seg
6.0	5.4	0.9
4.0	3.4	0.85
2.0	1.7	0.86

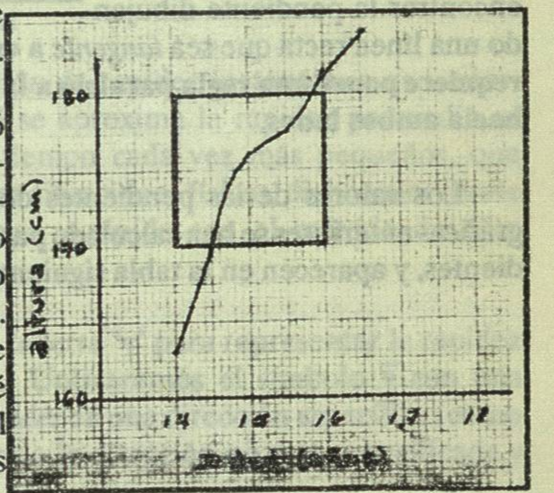
Ahora imaginemos que se va disminuyendo cada vez más el intervalo cerca del punto en que t = 10 segundos, hasta que la cantidad de curva que quede sea infinitamente pequeña. ¿Es razonable considerar que la pendiente de esa parte infinitesimal de curva es la misma que la pendiente de la recta de la cual parece formar parte? Creemos que sí. Es por eso que tomamos la pendiente de la recta que va desde t = 8 seg hasta t = 12 seg y la *llamamos* la rapidez *en* el punto medio t = 10 seg. El término correcto para esta cifra es la **rapidez instantánea** en el punto t = 10 seg.

Para calcular la rapidez instantánea de Ramón en un momento especial, medimos realmente la rapidez promedio en un intervalo de 4 segundos y después afirmamos lo anterior. Decidimos que la rapidez *instantánea* en un momento especial tiene el mismo valor que la rapidez *promedio* (Δd/Δt, con dos condiciones:

Primero, que el momento especial debe estar incluido en **Δt**.

Segundo, que la proporción Δd/Δt debe cubrir una parte lo bastante pequeña de la curva, como para que sea casi un segmento de recta. Bajo esta última condición la proporción no cambiará en forma notoria cuando la calculamos de nuevo con intervalos aún más pequeños.

Aquí nos ayudará un segundo ejemplo concreto. En el estudio más antiguo que se conoce de su tipo, el científico francés de Monbeillard registró periódicamente la altura de su hijo durante los años 1759 a 1777.



A partir de la gráfica que trazó se pude calcular el ritmo de crecimiento promedio, o rapidez promedio de crecimiento, en el período total de 18 años, o en cualquier otro período más corto dentro del total. Sin embargo, vamos a suponer que quisiéramos saber precisamente qué tan rápido estaba creciendo el muchacho cuando llegó a cumplir los