

**MONITOR PORTATIL DE FRECUENCIA CARDIACA PARA EL
EJERCICIO FISICO: ELECTROCARDIOTACOMETRO (EKT).**

<u>Calderón Becerra J.</u>	<u>Ramírez Gonzalez M.</u>	<u>Paulin Wesseling R.</u>
<u>Cabrera Cortina J.</u>	<u>Cortes Coronado L.*</u>	<u>Barrientos Martínez M. **</u>
<u>Baez García C.</u>	<u>Escandón Martínez B. **</u>	<u>Brust Carmona H. ***</u>

Sector Salud:

Dirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico ***

Centro de Desarrollo y Aplicaciones Tecnológicas

Dirección de Sistemas y Procedimientos Médicos de Apoyo **

Universidad LaSalle. Dirección de Actividades Deportivas *

RESUMEN.

Se presenta el circuito de un convertidor de frecuencia cardiaca-voltaje cuyo diseño permite monitorear continuamente la frecuencia cardiaca durante el ejercicio físico. La validación de este monitor se hizo por comparación con las mediciones hechas con el estetoscopio y empleando el registro continuo conectando el EKT a una microcomputadora. Los resultados de esta investigación indican que el EKT tiene la misma exactitud que el estetoscopio y es superior a este cuando se requieren mediciones continuas durante el ejercicio físico.

PRINCIPIO DE OPERACION DEL EKT.

El EKT es un convertidor de frecuencia cardiaca - voltaje diseñado en el CEDAT empleando como referencias para su diseño y ensamble las

especificaciones de las normas industriales de fabricación de monitores de frecuencia cardíaca (American National Standard. Cardiac Monitors, heart rate meters and alarms. EC 13-1983).

El EKT es un monitor portátil que opera básicamente en cuatro etapas como se ilustra a continuación:

TRANSDUCTOR -- AMPLIFICADOR --- CONVERTIDOR --- SALIDA

Transductor.

Para detectar la frecuencia cardíaca se usa como transductor a tres electrodos de plata - cloruro de plata colocados sobre la piel del torax al nivel de los quintos espacios intercostales. La disposición de los electrodos es tal que permite obtener la máxima amplitud del complejo electrocardiográfico QRS.

El diagrama de bloques del EKT y el procesamiento de la señal bioeléctrica capturada por el transductor se ilustran en la Figura 1.

Amplificador.

El amplificador consta de los primeros cinco bloques de la Figura 1. Sus características son: una relación de rechazo en modo común mayor de 80 dB, una frecuencia corte en bajas de 8 Hz y en altas de 25 Hz, y una amplificación mínima de 1000 y máxima de 3000; lo que nos permite una operación eficaz del circuito tolerando hasta un 40 % de ruido de 60 Hz.

Convertidor.

El convertidor de frecuencia - voltaje propiamente dicho consta de los bloques 6 a 9 ilustrados en la Figura 1. Esta parte del circuito está diseñada para una conversión de 30 a 250 latidos por minuto (lpm), generando una curva que es lineal que va desde 0.6 hasta 6.3 Volts, como se muestra en la Figura 2.

Debido a la constante de tiempo del detector de pico, cuando se enciende el EKT el monitor inicia su funcionamiento después de 4 segundos. La frecuencia cardíaca estimada por el convertidor es una frecuencia promedio muestreada a intervalos de 3.3 segundos, que es la constante de tiempo del integrador; esta característica del integrador ocasiona un retraso para la activación de la salida del circuito en 7 segundos cuando la frecuencia cardíaca cambia subitamente de 60 a 120 lpm, y de 9 segundos cuando el cambio ocurre de 120 a 60 lpm.

La sensibilidad del EKT para medir la frecuencia cardíaca es de ± 10 lpm cuando la medición está por debajo de 100 lpm; y es de ± 5 lpm, cuando la medición está por arriba de 100 lpm. La reproducibilidad de la curva de calibración a los tres diferentes niveles de ganancia con que está provisto el EKT es superior a 99 %.

Salida.

La salida del convertidor permite al usuario del EKT conocer su frecuencia cardíaca en lpm mediante señales auditivas. La salida está integrada por los bloques 10 a 14 de la Figura 1. En esta sección del circuito se compara el voltaje obtenido del convertidor con voltajes equivalentes a frecuencias de 30 a 250 lpm. La salida incluye dos comparadores: uno de altas y uno de bajas, los cuales activan alarmas aguda y grave, respectivamente. Esta organización del comparador doble permite utilizar una "ventana" de trabajo para el usuario, de

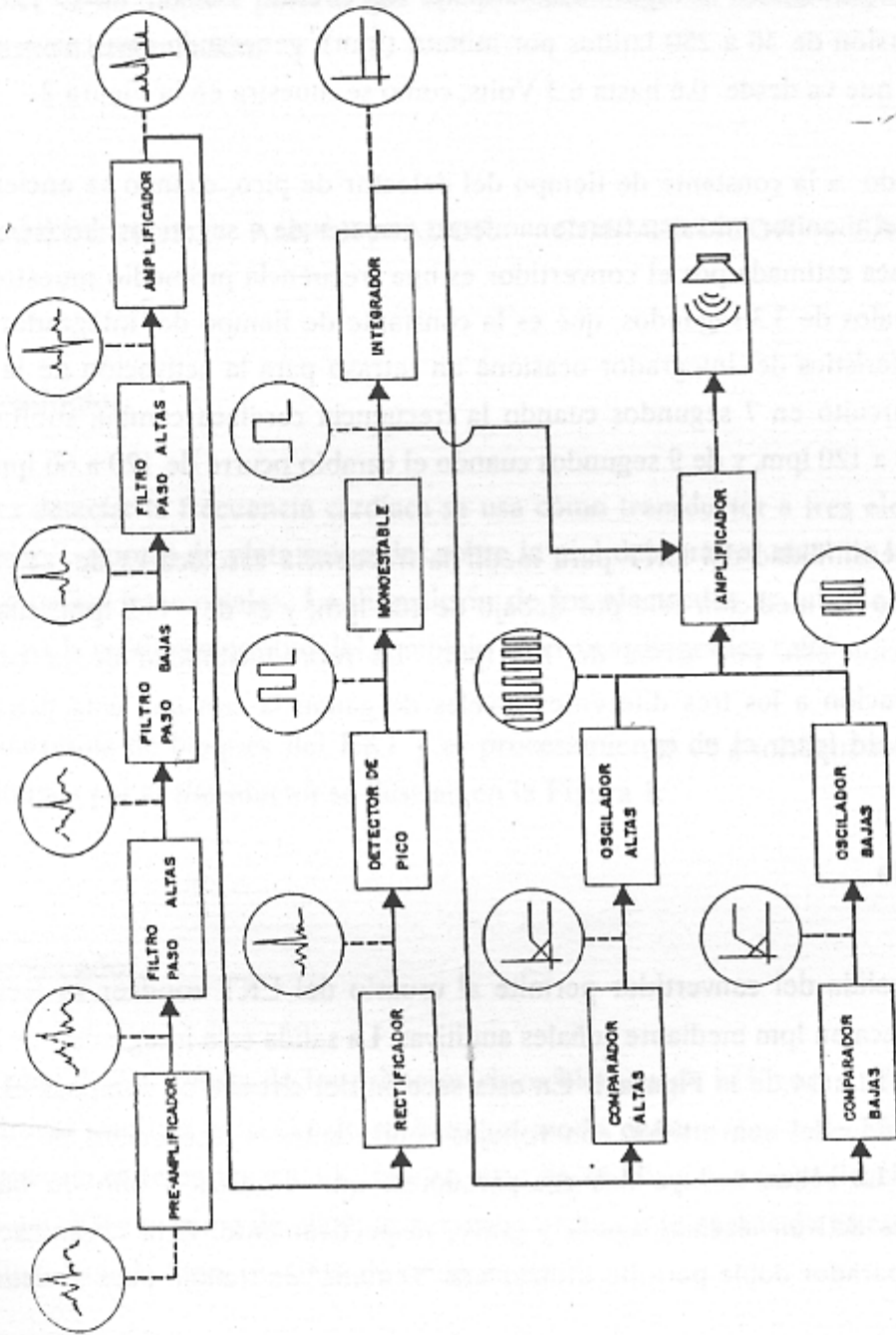


FIGURA 1. DIAGRAMA A BLOQUES DEL EKT

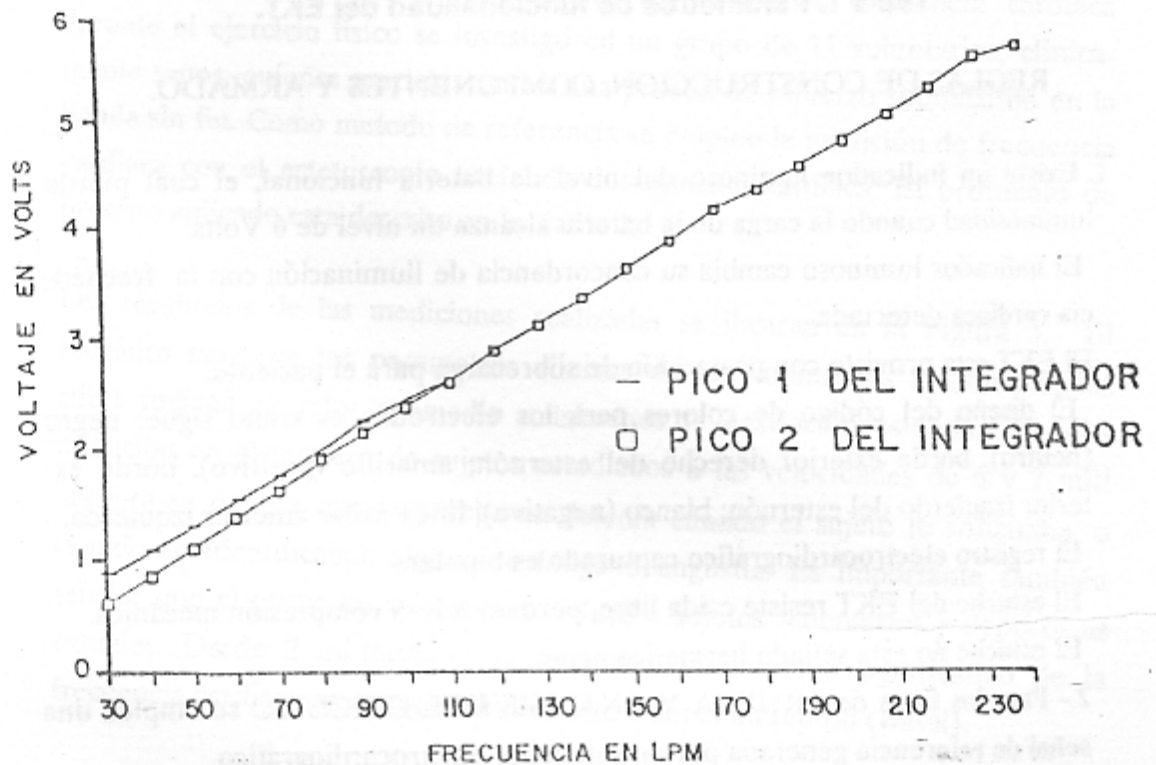


FIGURA 2. CURVA DE CALIBRACION EKT

manera que cuando hace ejercicio puede establecer límites para el monitoreo continuo de su esfuerzo cardíaco mínimo y máximo.

Además de las alarmas, el EKT posee un indicador luminoso que se activa con cada latido cardíaco procesado en el circuito.

Los parámetros de funcionalidad del EKT se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parametros de funcionalidad del EKT.

REGLAS DE CONSTRUCCION, COMPONENTES Y ARMADO.

1. Existe un indicador luminoso del nivel de batería funcional, el cual pierde luminosidad cuando la carga de la batería alcanza un nivel de 6 Volts.

El indicador luminoso cambia su concordancia de iluminación con la frecuencia cardíaca detectada.

El EKT esta provisto con protección de sobrecarga para el paciente.

El diseño del código de colores para los electrodos es como sigue: negro (neutro), borde exterior derecho del esternón; amarillo (positivo), borde exterior izquierdo del esternón; blanco (negativo), línea axilar anterior izquierda.

El registro electrocardiográfico capturado es bipolar.

El estuche del EKT resiste caída libre, pero no tolera compresión mecánica.

El estuche no esta sellado hermeticamente.

2.- Para los fines de PRUEBA Y ANALISIS DEL CIRCUITO se emplea una señal de referencia generada por un simulador electrocardiográfico.

3.- El ancho de banda es de 8 a 25 Hz, teniendo 20 dB de atenuación a 1 Hz, y 30 dB a 60 Hz. 4.- La impedancia de entrada es mucho mayor de 2.4 megaOhm con una variación relativa de la amplitud inferior a 0.2

5.- El circuito tolera satisfactoriamente la prueba de polarización en serie y en paralelo cuando se emplean +300 mV.

6.- La corriente auxiliar del paciente en el circuito es mucho menor de 0.1 microAmper.

7.- El rechazo de modo común para el EKT es de 94.3 dB.

8.- El detector de pico tiene un retraso de 4 segundos.

- 9.- La linealidad de la respuesta del EKT indica un coeficiente de correlación de 0.99 con valores de pendiente para los picos 1 y 2 del integrador de 0.024 y 0.023, respectivamente.
- 10.- El tiempo de respuesta de alarma al cambiar la frecuencia de 60 a 120 lpm es de 7.2 segundos; y cuando de 120 a 60, es de 9.1 segundos

VALIDACION CLINICA DE LA FUNCIONALIDAD DEL EKT.

La funcionalidad clínica del EKT para monitorear la frecuencia cardíaca durante el ejercicio físico se investigó en un grupo de 11 voluntarios, clínicamente sanos, quienes participaron en una prueba de esfuerzo submáximo en la banda sin fin. Como método de referencia se empleó la medición de frecuencia cardíaca con el estetoscopio haciendo auscultación cardíaca. El protocolo de pruebas aplicado está descrito en la Tabla 2.

Los resultados de las mediciones realizadas se ilustran en la Figura 3. El recuadro contiene los parámetros clínicos de los voluntarios estudiados; las cifras indican el valor promedio más/menos la desviación estándar. La disminución en el número de sujetos estudiados a las velocidades de 6 y 7 millas/hora se debe a que la prueba se detenía cuando el sujeto lo solicitaba, o cuando se identificaban signos de fatiga o angustia. Es importante también señalar que el grupo de voluntarios incluyó a sujetos sedentarios y deportistas casuales. Desde 2 millas/hora se encontró un aumento significativo de la frecuencia cardíaca en comparación con los valores en reposo (Basal).

En el curso de la prueba se hizo un registro continuo del EKT con el osciloscopio. Se comprobó que la concordancia entre la señal del amplificador y la salida del monostable es satisfactoria a todas las velocidades analizadas; aun cuando el sujeto va trotando y brazeando vigorosamente. Sin embargo, al alcanzar 3 millas/hora, la frecuencia cardíaca ya no fue audible con el estetoscopio; así, las mediciones reportadas en la Figura 3 corresponden a las frecuencias que alcanzaron los sujetos 15 segundos después de los esfuerzos escalonados mientras caminaban a 2 millas/hora.

Tabla 2. Protocolo de pruebas de esfuerzo submaximo en la banda sin fin.

Valoración clínica de los voluntarios mediante historia clínica y registro electrocardiográfico un día antes de la prueba.

El día de la prueba, instalación del EKT y reposo durante 10 minutos.

Inicio del trabajo en la banda sin fin a nivel horizontal.

A intervalos de 3 minutos se incrementa la velocidad progresivamente desde 1 hasta 7 millas/hora.

Al término de cada intervalo se hacen mediciones con cada una de las escalas del EKT (altas y bajas) y con el estetoscopio (durante 15 segundos). NOTA: cuando los latidos cardíacos no sean audibles con el estetoscopio, debido al trote del sujeto, se disminuye la velocidad hasta 2 millas/hora en un lapso de 15 segundos. Después de la medición se vuelve a incrementar la velocidad al valor correspondiente en 15 segundos).

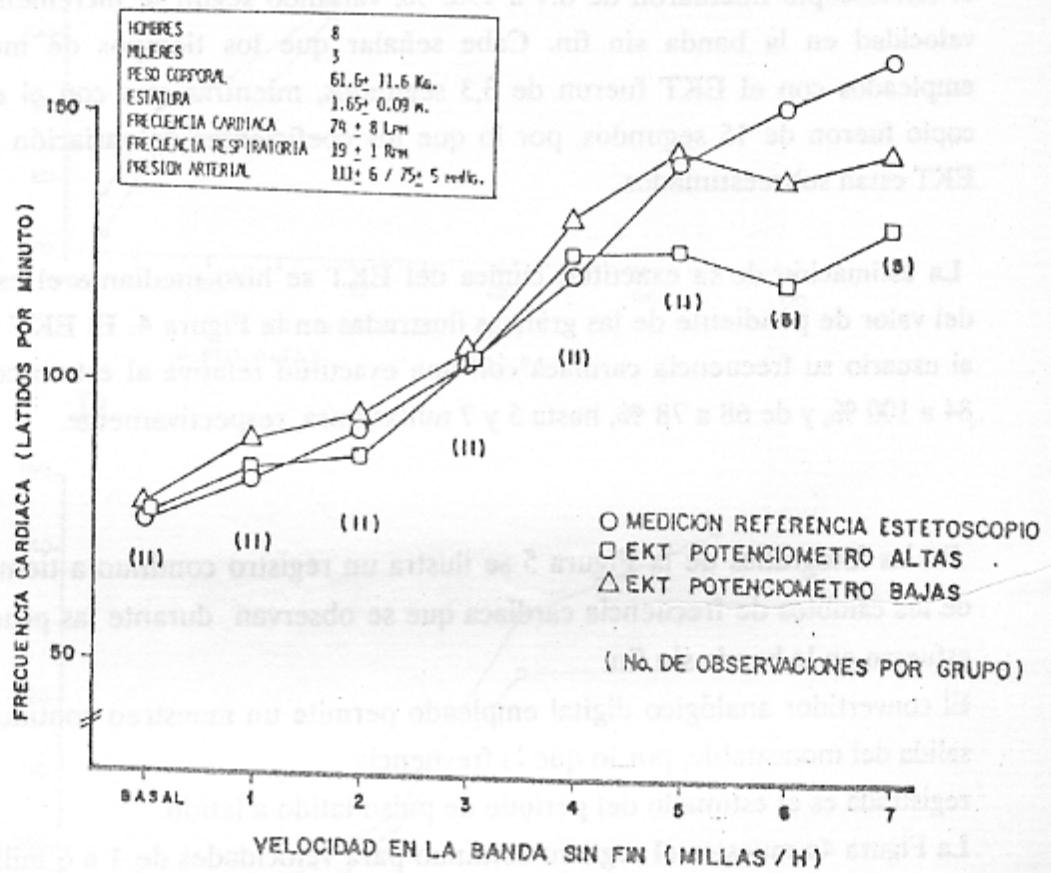


FIGURA 3. VALIDACION CLINICA DEL EKT

El análisis de varianza para comparar los estimados de frecuencia cardíaca obtenidos con los potenciómetros del EKT (de altas y bajas) y los del estetoscopio, indica que no hay diferencias significativas hasta 6 millas/hora. La máxima diferencia a 7 millas/hora fue de 17 lpm. Los coeficientes de variación estimados clínicamente para el EKT fluctuaron de 10.8 a 22.5 % y de 11.1 a 22.9 % para los potenciómetros de altas y bajas, respectivamente; mientras que para el estetoscopio fluctuaron de 8.4 a 19.2 %, variando según se incrementaba la velocidad en la banda sin fin. Cabe señalar que los tiempos de muestreo empleados con el EKT fueron de 3,3 segundos, mientras que con el estetoscopio fueron de 15 segundos, por lo que los coeficientes de variación para el EKT están sobreestimados.

La estimación de la exactitud clínica del EKT se hizo mediante el estimado del valor de pendiente de las gráficas ilustradas en la Figura 4. El EKT reporta al usuario su frecuencia cardíaca con una exactitud relativa al estetoscopio de 84 a 100 %, y de 68 a 78 %, hasta 5 y 7 millas/hora, respectivamente.

En las fotografías de la Figura 5 se ilustra un registro continuo a tiempo real de los cambios de frecuencia cardíaca que se observan durante las pruebas de esfuerzo en la banda sin fin.

El convertidor analógico digital empleado permite un muestreo continuo de la salida del monostable, por lo que la frecuencia registrada es el estimado del periodo de pulso latido a latido.

La Figura 4a muestra el registro continuo para velocidades de 1 a 6 millas/hora a intervalos de 30 segundos. En la Figura 4b se ilustra el incremento de frecuencia cardíaca ocasionado con aumentos de la velocidad de 1, 3, 5 y 7 millas/hora a intervalos de 30 segundos; e inmediatamente la recuperación del sujeto caminando a 2 millas/hora durante 3 minutos.

Actualmente se está utilizando el EKT para monitorear continuamente la magnitud del esfuerzo cardíaco durante programas de entrenamiento.

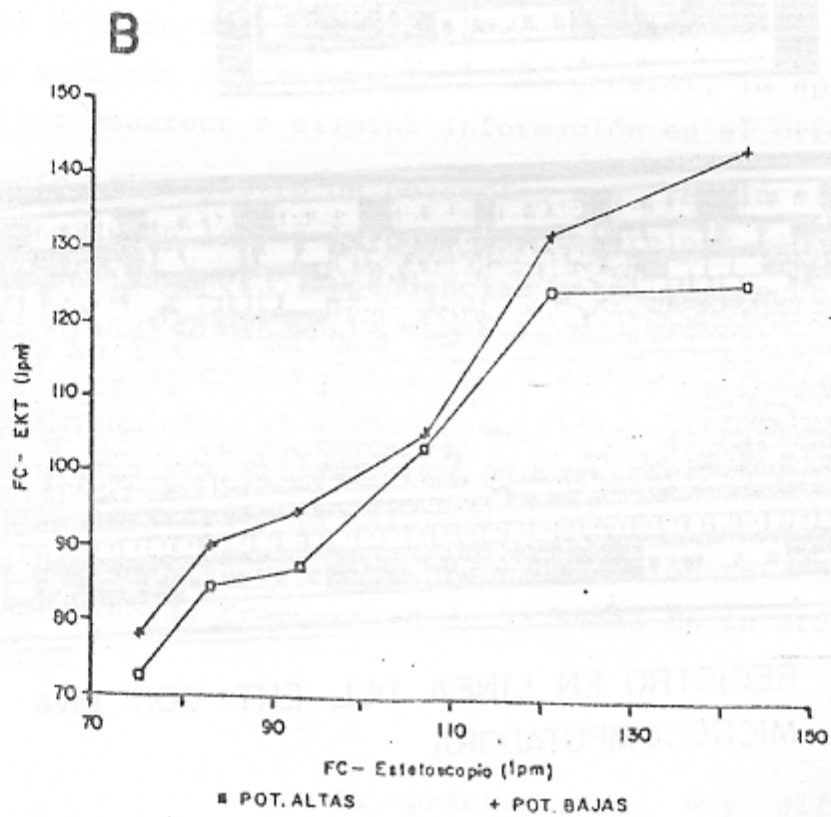
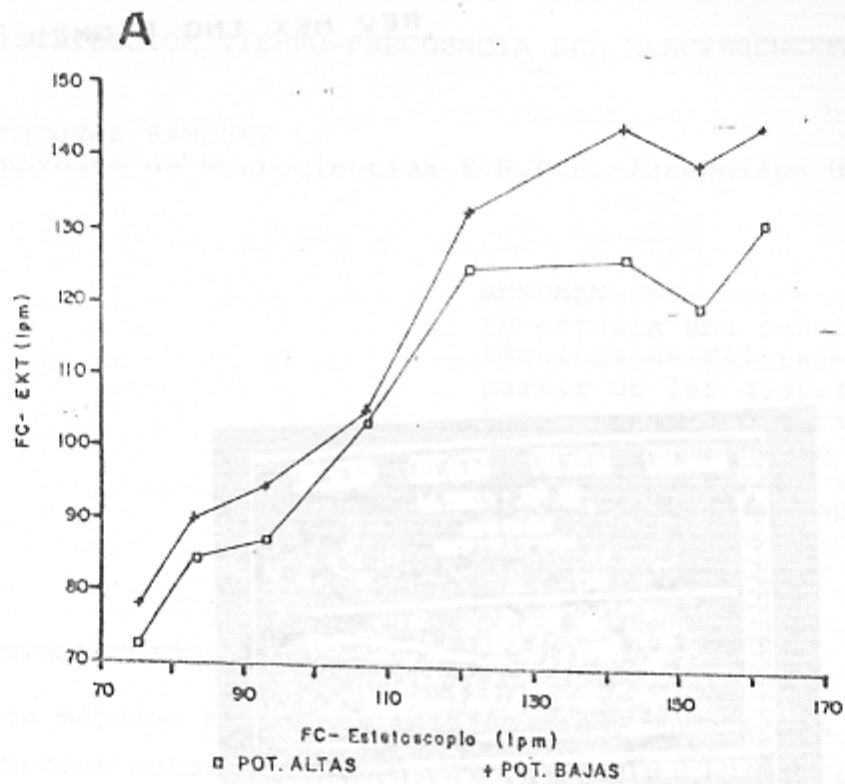


FIGURA 4. CORRELACION DE METODOS A) HASTA 7 MILLAS / H.;
B) HASTA 5 MILLAS / H.

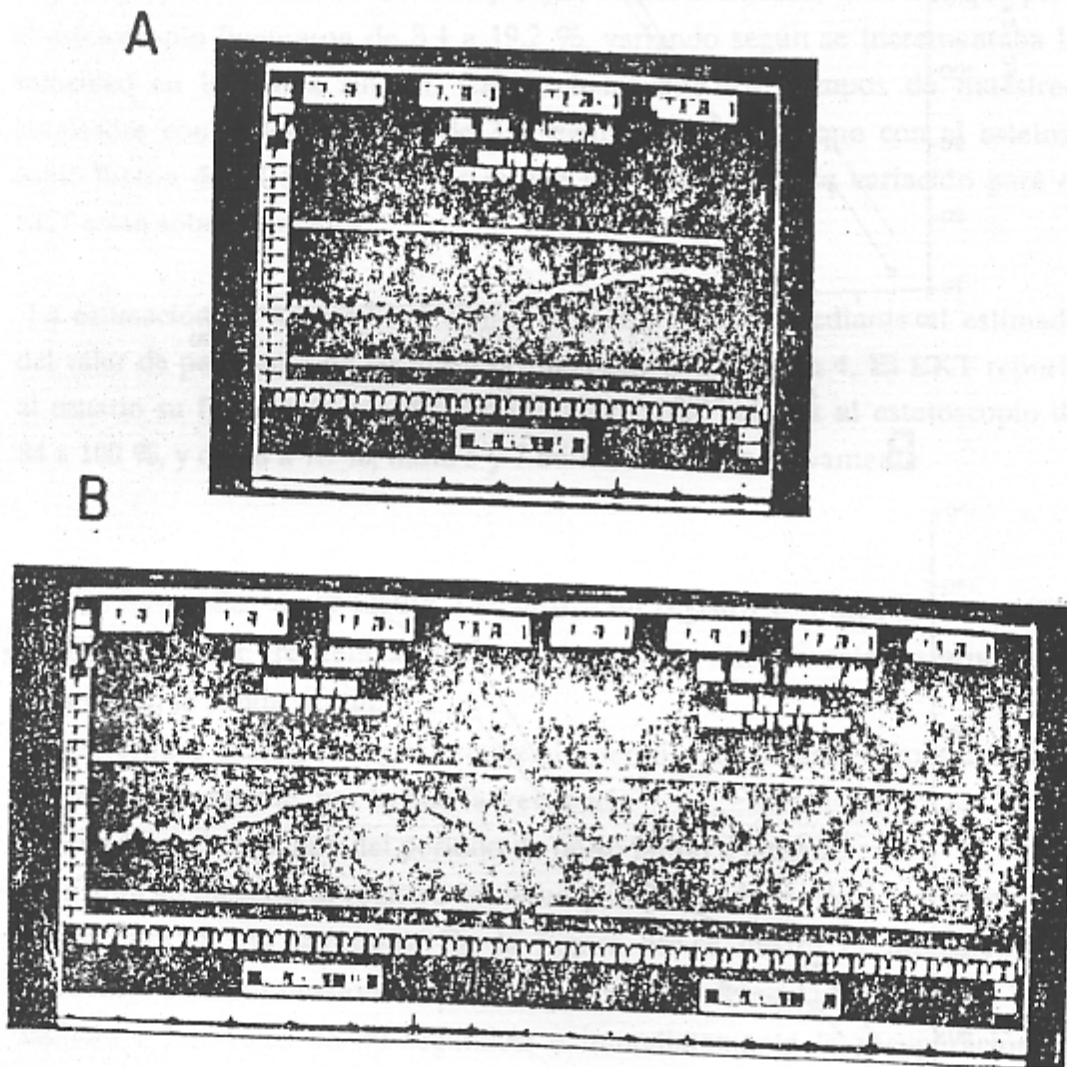


FIGURA 5. REGISTRO EN LINEA DEL EKT CON UNA MICROCOMPUTADORA