

PREDICCIÓN DE LA INTELIGIBILIDAD EN RECINTOS CERRADOS

Antoni Oliver González
Josep Martí i Roca

Departamento de Acústica y Vibraciones de la Ingeniería La Salle
Universitat Ramon Lull
Passeig de la Bonanova 8
08022 Barcelona

Introducción teórica

V.M.A. Peutz [2] realizó una serie de experiencias y demostró que la inteligibilidad decrece con el incremento de la distancia fuente-receptor, hasta una distancia crítica D_L^1 , más allá de la cual la inteligibilidad se mantiene constante, e independiente de la distancia entre fuente y receptor. Definió el concepto de pérdida de articulación de consonantes (%ALcons) que estaba muy relacionado con la inteligibilidad, y a la vez relacionado de una manera sencilla con la acústica de la sala y la relación señal-ruido. Peutz realizó estas experiencias con un altavoz omnidireccional ($Q = 1$). Posteriormente Klein estudió el efecto de la directividad de la fuente (Q) sobre el %ALcons, y estableció la siguiente relación entre ellas:

$$\%ALcons = \frac{200D^2T^2}{VQ} \quad (1)$$

Donde: T : Tiempo de reverberación (para 1400 Hz); V : Volumen de la sala (en m^3); D : Distancia fuente-receptor (en m); Q : Directividad de la fuente utilizada.

H.J.M. Steeneken y T.Houtgast [3] crearon un método físico de medida de la inteligibilidad, que representaba una extensión del método AI. El método de medida se basa en la Función de Transferencia de la modulación (M.T.F.: Modulation Transfer Function). El índice resultante se llama Índice de Transmisión de la Voz (S.T.I.: Speech Transmission Index). Concretamente, el S.T.I. se determina a partir de la evaluación del M.T.F. para 14 frecuencias de modulación para 7 bandas de octava (98 puntos). A partir del S.T.I., y para reducir el tiempo de medida, se diseñó el R.A.S.T.I. (Rapid Speech Transmission Index), que analiza 9 frecuencias de modulación, 4 para la banda de 500 Hz y 5 para la de 2 KHz. Schroeder demostró que la Función de Transferencia de Modulación (M.T.F.) se puede determinar a partir de la transformada de Fourier del cuadrado de la respuesta impulsional de un sistema lineal pasivo, dividida por la energía total de la respuesta impulsional. Esta demostración ha abierto grandes posibilidades de medida y predicción de la inteligibilidad, siempre que seamos capaces de medir o predecir con suficiente precisión la respuesta impulsional del local bajo estudio.

Kenneth D. Jacob [6] llevó a cabo una serie de experiencias para demostrar las imprecisiones de la fórmula de Klein (1) y ha presentado un método simplificado de predicción

¹ No se debe confundir la distancia crítica definida por Peutz D_L , con la distancia crítica para la cual el campo reverberante iguala al campo directo, D_c . La relación entre ambas: $D_L = 3'16 D_c$.

de la respuesta impulsional de un recinto. La simulación de la respuesta impulsional de un recinto requiere la evaluación de un gran número de reflexiones. Jacob [7] propone la utilización de la llamada Curva Híbrida de Decaimiento de la Energía (H.E.D.C.: Hybrid Energy Decay Curve). Para la generación de esta curva se utiliza el método de la fuente imagen para la predicción de las primeras llegadas discretas provocadas por tres o menos reflexiones. A partir de aquí se utiliza un modelo estadístico de decaimiento de energía. Para predecir el índice de modulación utiliza una modificación de la expresión de Schroeder.

Objetivos

El objetivo de este estudio es el determinar si existe una relación directa entre la relación nivel directo - nivel reverberante y la inteligibilidad (en nuestro caso el R.A.S.T.I.) para recintos cerrados. También se evaluarán los errores producidos en la aplicación de la fórmula de Klein.

Metodología de trabajo

Se conocen los siguientes datos de 5 recintos, 4 de los cuales se emplearon en los J.J.O.O. Barcelona 92 :

- Tiempo de reverberación a 500 Hz, 1 KHz y 2 KHz
- RASTI medido en una serie de puntos también conocidos
- Geometría del recinto
- Características direccionales de las fuentes, su ubicación y orientación

Tabla I.- Características de los recintos analizados.

Nombre del recinto:	Volumen	Superficie	Tr 500	Tr 1K	Tr 2K
P. M. de Granollers	70.000	10.500	4.1	3.9	3.6
P. M. E. de Badalona	146.860	27.400	2.8	2.6	2.6
P. M. Vall d'Hebró	45.000	12.810	2.4	3.8	2.6
P. M. de Montjuich	67.000	12.000	3.7	2.7	2.6
Sala d'actes E.U.E.T.T.	240	284	0.44	0.33	0.32

Se ha calculado el nivel directo a partir de la ley inversa de la distancia, teniendo en cuenta las características direccionales de las fuentes utilizadas; y el nivel reverberante a partir de la teoría puramente estadística. De aquí se ha deducido la relación nivel directo - nivel reverberante (Nd-Nr), para las bandas de octava de 500 Hz, 1 KHz i 2 KHz. Para evaluar los errores cometidos en la aplicación de la fórmula de Klein, hemos expresado esta fórmula en función de Nd-Nr, quedando:

$$\text{Para } Nd-Nr > -10 \text{ dB: } \%ALcons = \frac{T}{1'56 \cdot 10^{\frac{Nd-Nr}{10}}} \quad (2)^2 \quad \text{Para } Nd-Nr < -10 \text{ dB: } \%ALcons = 9 \cdot T \quad (3)$$

Para transformar los resultados de %ALcons a RASTI hemos utilizado la expresión de F. Becker:

$$RASTI = -0'1845 \cdot \ln(\%ALcons) + 0'9482 \quad (4)$$

Para comprobar la existencia de una relación directa entre Nd-Nr y el RASTI, hemos graficado cada uno de los valores de RASTI medidos según el Nd-Nr calculado. Posteriormente hemos trazado una recta de regresión, calculando los errores entre los valores dado por la recta y los realmente medidos, para cada uno de los recintos estudiados (fig 1).

² Expresión válida únicamente para coeficientes de absorción medios (α_m) pequeños.

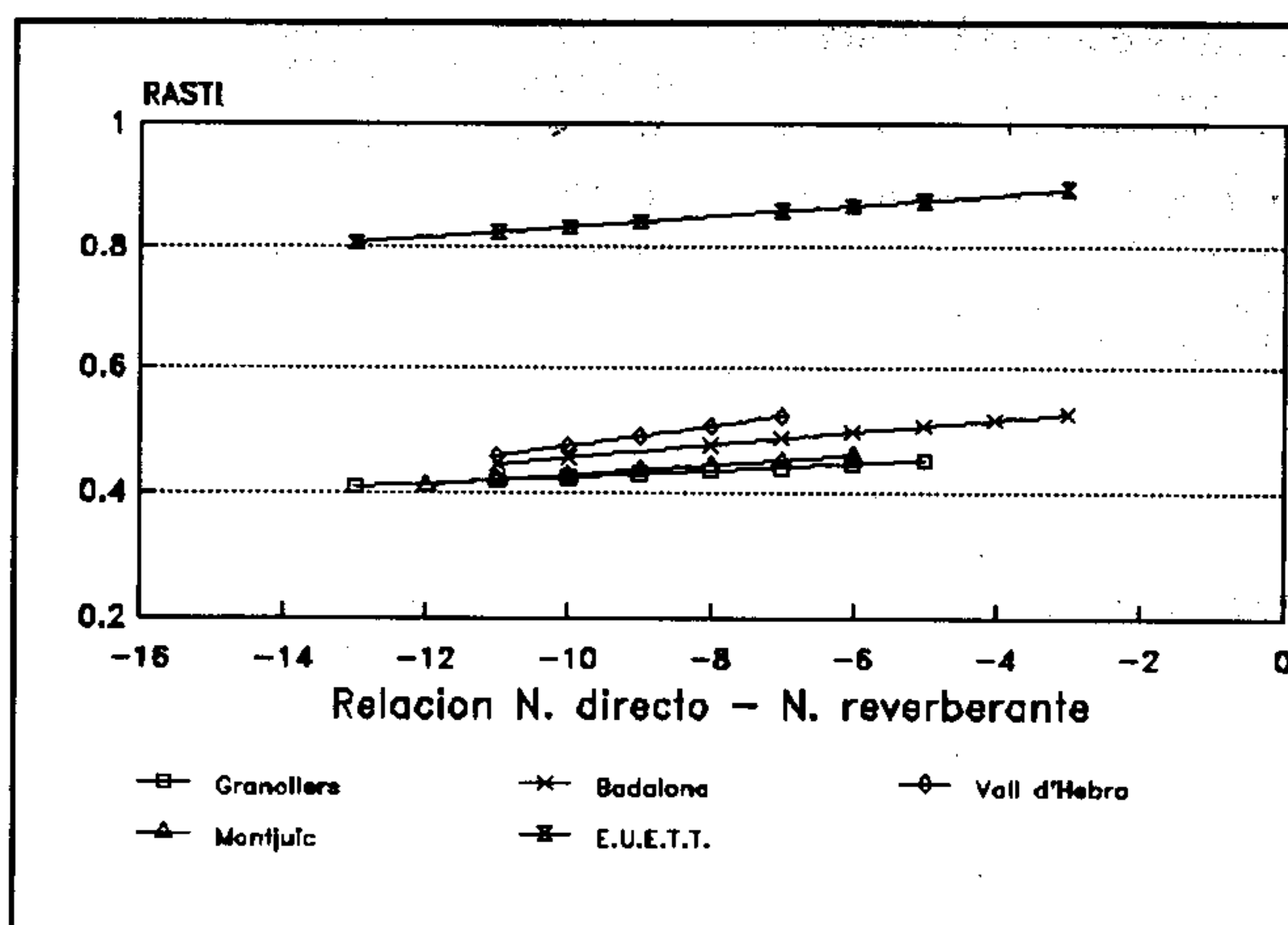


Fig. 1.- Rectas de regresión Nd-Nr calculado - RASTI para F = 2 KHz

Resultados

A continuación presentamos los errores medios y máximos cometidos al aplicar la fórmula de Klein, para las bandas de 1 KHz y 2 KHz. También presentamos unos gráficos RASTI previsto - RASTI medido correspondientes a esta fórmula y para las mismas frecuencias (fig. 2 y 3).

Tabla II.- Errores medios y máximos cometidos con la aplicación de la fórmula de Klein

Nombre del recinto	% Error 1 K		% Error 2 K	
	MEDIO	MÁXIMO	MEDIO	MÁXIMO
Palau Municipal de Granollers	29'1	44'8	20'5	33'3
Palau Municipal de Badalona	21'1	31'3	20'1	35'1
Palau Municipal Vall d'Hebró	51'3	80	19'8	37'8
Palau Municipal de Montjuich	16'4	38'9	14'9	35'1
Sala de actos E.U.E.T.T.			8'5	17

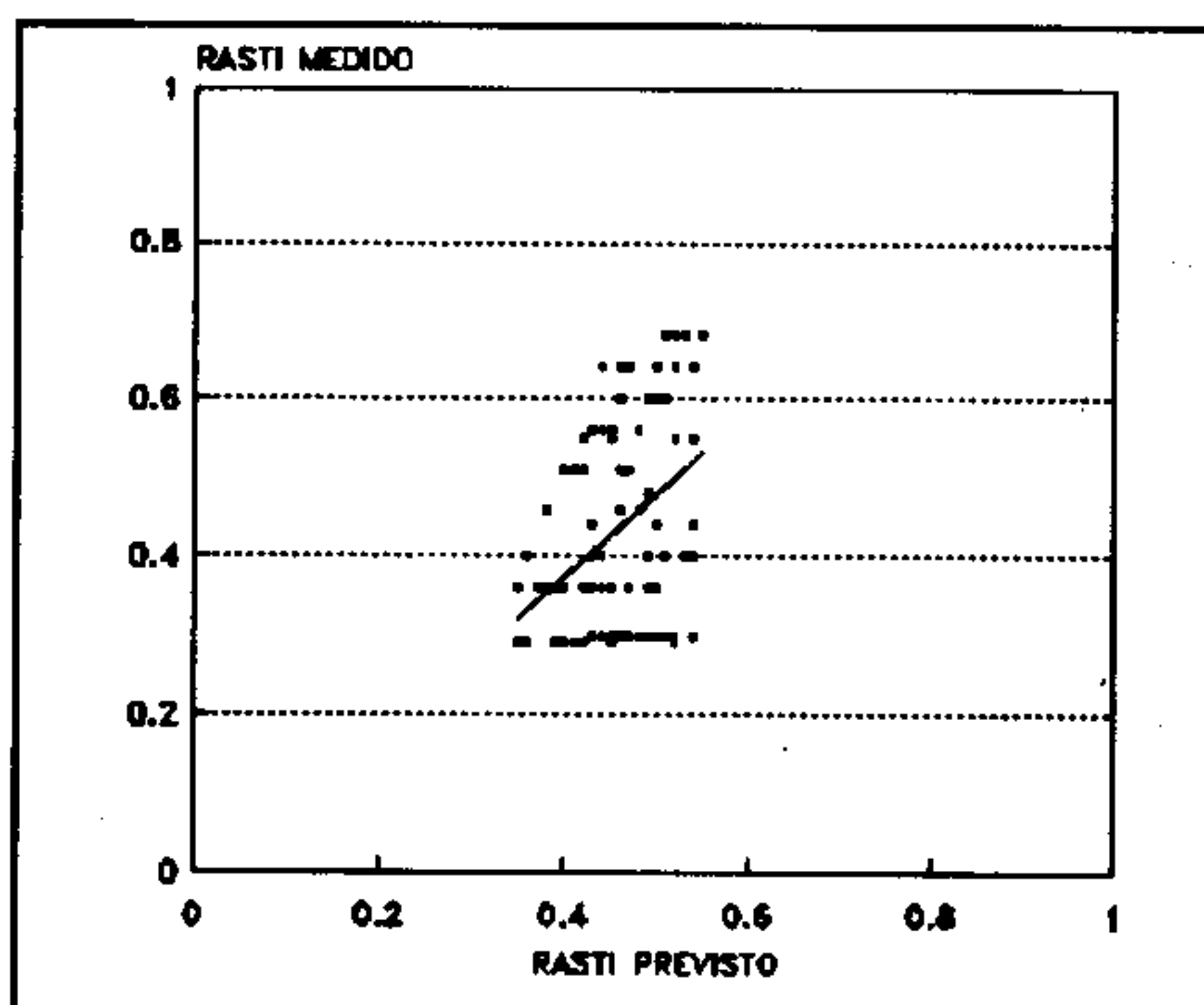


fig. 2.- Gráfico RASTI medido - RASTI previsto mediante la fórmula de Klein. $f = 1$ KHz.
 $r = 0'39$

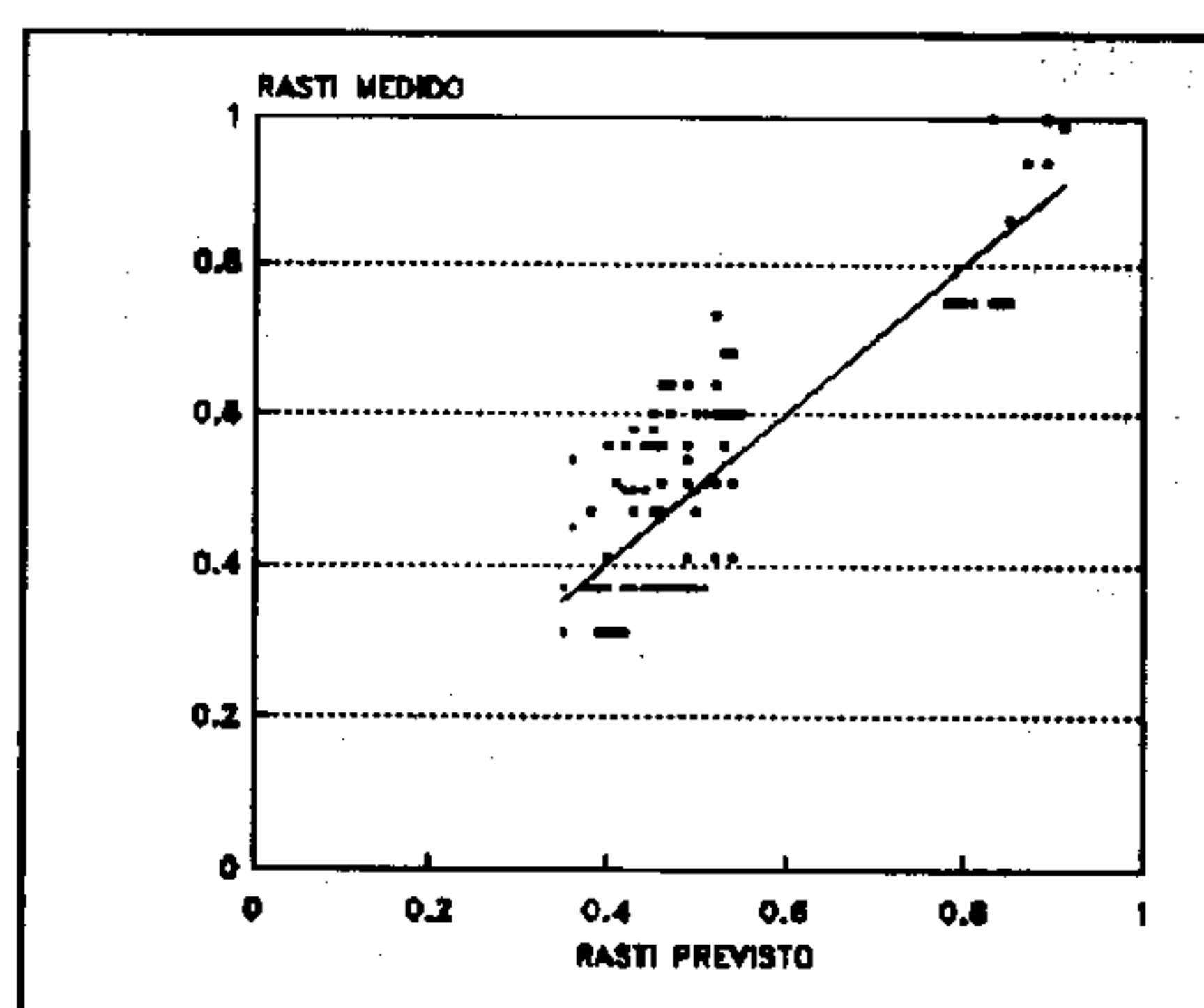


fig. 3.- Gráfico RASTI medido - RASTI previsto mediante la fórmula de Klein. $f = 2$ KHz.
 $r = 0'82$

Para evaluar la existencia de una relación entre Nd-Nr y el RASTI, hemos trazado unas rectas de regresión (fig. 1) y hemos considerado como RASTI previstos los dados por estas rectas. A continuación damos los errores de los RASTI "previstos" de esta manera y los realmente medidos.

Tabla III.- Errores medios y máximos aplicando interpolación

Nombre del recinto	% Error 1 K		% Error 2 K	
	MEDIO	MÁXIMO	MEDIO	MÁXIMO
Palau Municipal de Granollers	8'4	20'3	9'45	25'6
Palau Municipal de Badalona	6'2	11'6	4'7	10'9
Palau Municipal Vall d'Hebró	4'1	9'6	4'8	9'3
Palau Municipal de Montjuich	8'1	18'4	8	17'4
Sala de actos E.U.E.T.T.			3'9	8'4

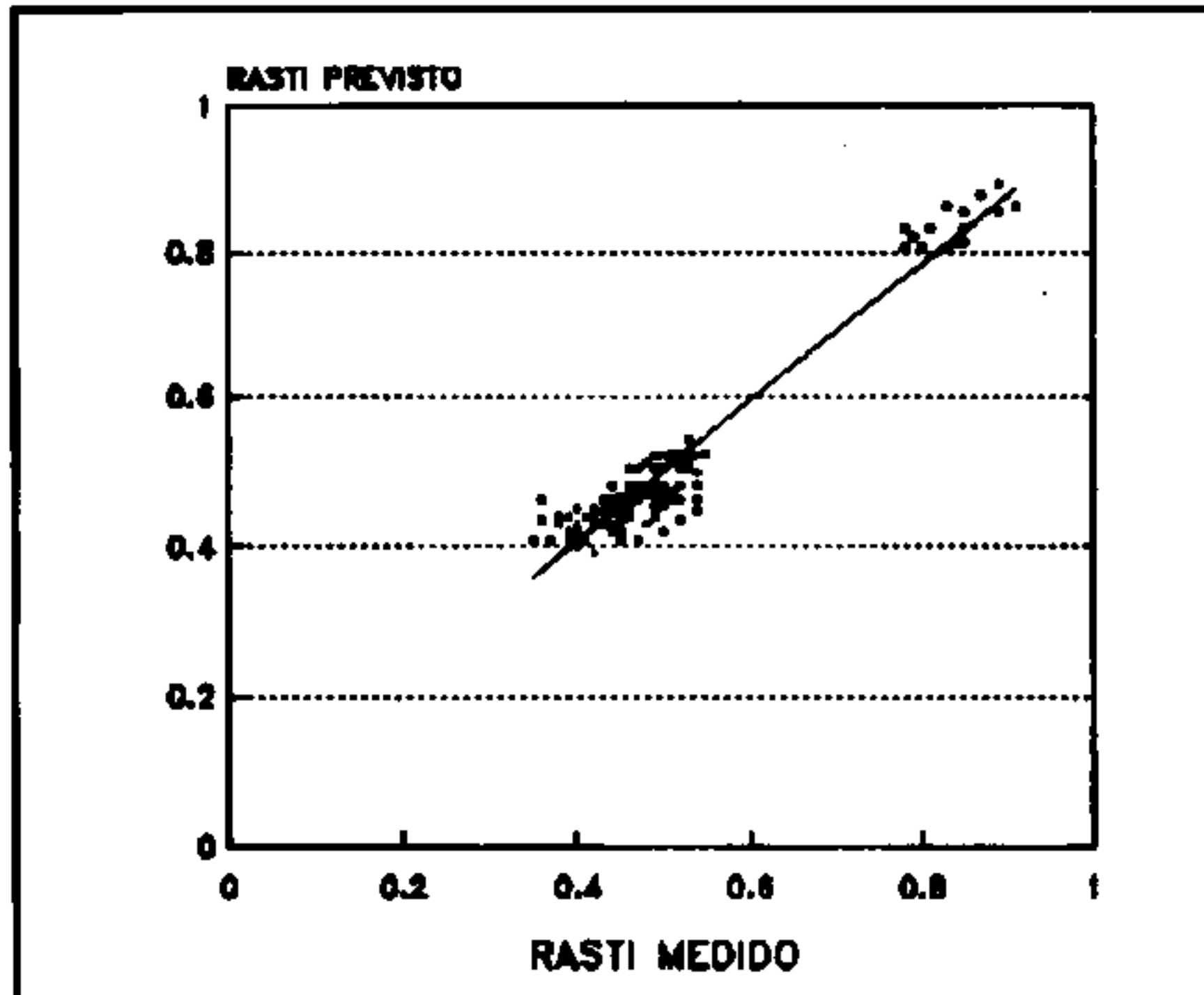


fig. 4.- Gráfico RASTI medido - RASTI dado por la recta de interpolación. $f = 500 \text{ Hz}$.
 $r = 0'96$

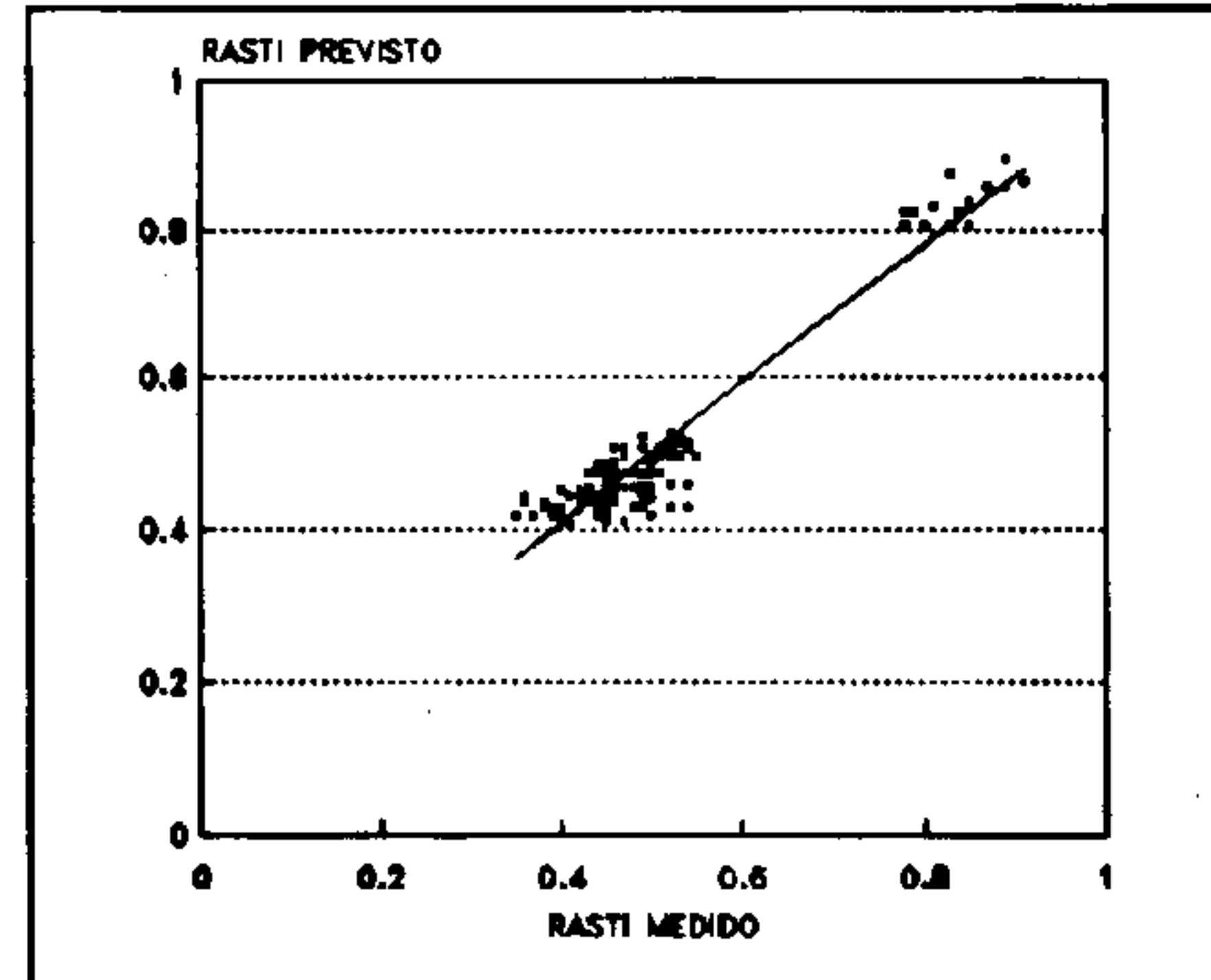


fig. 5.- Gráfico RASTI medido - RASTI dado por la recta de interpolación. $f = 2 \text{ KHz}$.
 $r = 0'96$

Conclusiones

La ventaja de la fórmula de Klein es su simplicidad, que la hace rápidamente aplicable a cualquier caso concreto. Los errores a los que conduce, no obstante, la desaconsejan totalmente. El método propuesto por Jacob requiere la utilización de la teoría geométrica para el cálculo de las primeras llegadas. Esto implica un conocimiento y representación muy detallados del recinto bajo estudio, de las fuentes sonoras utilizadas, y de los materiales acústicos presentes. El presente estudio demuestra que la relación nivel directo - nivel reverberante calculado con la teoría puramente estadística puede ser un buen indicador de la inteligibilidad (RASTI) media de un recinto cerrado. No se han determinado las ecuaciones concretas de cálculo por no haberse extendido el estudio a un número suficiente de recintos. El Departamento de Acústica y Vibraciones de la Ingeniería la Salle (Barcelona) tiene previsto extender el presente estudio a un mayor número de recintos a fin de determinar las ecuaciones concretas de cálculo. Las ecuaciones que se encuentren no pretenden constituir un método más preciso que el elaborado por Jacob [7], pero sí de más fácil aplicación.

Bibliografía:

- [1] Karl D. Kryter, "Methods for the Calculation and Use of the Articulation Index", J. Acoustical Society of America, vol. 34, nº 11, pp. 1689-1697 (noviembre 1962)
- [2] V.M.A. Peutz, "Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room", J. Audio Engineering Society, vol. 19, nº 11, pp. 915-919 (Diciembre 1971)
- [3] H.J.M. Steeneken, T. Houtgast "A physical Method for Measuring Speech Transmission quality", J. Acoustical Society of America, vol. 67, nº 1, pp.318-326 (Enero 1980)
- [4] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, R. Plomp, "Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I.- General Room Acoustics", Acustica, vol. 46, pp. 60-72 (1980)
- [5] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, "A Review of the MTF Concept in Room Acoustics and Its Use for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria", J. Acoustical Society of America, vol. 77, nº 3, pp. 1069-1077 (Marzo 1985)
- [6] Kenneth D. JAcob, "Subjective and Predictive Measures of Speech Intelligibility - The Role of Loudspeaker Directivity", J. Audio Engineering Society, vol. 33, nº 12, pp. 950-955 (Diciembre 1985)
- [7] K.D. Jacob, T.K. Birkle, C.B. Ickler "Accurate Prediction of Speech Intelligibility Without the Use of In-Room Measurements", J. Audio Engineering Society, vol. 39, nº 4, pp. 232-241 (Abril 1991)
- [8] D. Keele J.R., "Evaluation of Room Speech Transmission Index and Modulation Transfer Function by the Use of Time Delay Spectrometry", The proceedings of the AES 6th International Conference: Sound Reinforcement