

# Caudal de información y control del proceso

**ANTONIO SARABIA GONZALEZ**

**Director Técnico de S. A. Española de Cementos Portland**

No ofrece duda que la meta última para toda EMPRESA, creada con la finalidad de producir bienes comerciables, es la obtención de la máxima ganancia en la operación empresarial, es decir, de la actividad del TRABAJO en el sentido más amplio, aplicado sobre los bienes que se agrupan dentro de la denominación de CAPITAL, también en su más amplio sentido.

El sistema en sí mismo y su operación son complejos por naturaleza. Implica un número crecido de variables que hacen que el resultado final quede condicionado a decisiones de compromiso con las que se pretende obtener el resultado óptimo conseguible a partir de las posibilidades de la realidad actual de la operación empresarial.

El proceso fabril, cuya realización, en el caso del tipo de EMPRESA a que nos referimos, justifica la existencia de ésta, juega un papel importantísimo. Sus metas, como antes, coinciden con la obtención del resultado más favorable: máxima obtención de bienes de la más alta calidad con el mínimo sacrificio de bienes o servicios.

En nosotros, técnicos al servicio del proceso, suele recaer la responsabilidad de hallar el valor óptimo en este tramo de la operación empresarial que, quizás con mayor fuerza que en otros, exige la ponderación y análisis del comportamiento de múltiples variables.

Entre ellas cuenta el estudio de la introducción de las aportaciones, ofrecidas por otras ramas del trabajo humano operante en tecnologías ajenas en la específica del o de los procesos básicos explotados en la empresa propia.

Prueba de la importancia de esta incidencia son los COLOQUIOS, a que asistimos, dedicados por sus organizadores, con sentido pleno, a ofrecer a los técnicos españoles interesados en la industria del cemento, un contacto directo con las bases en que se apoya y las posibles aplicaciones a nuestro quehacer, de los hallazgos y espectaculares realizaciones logradas en el campo de la Automación.

Como vosotros, vivamente interesado por el tema, me he atrevido a solicitar unos minutos de vuestra atención, para exponer mis personales reflexiones acerca del mismo.

Para cuantos trabajamos en la producción de cemento, es claro que ésta constituye un buen ejemplo de "industrialización" de una tecnología, entendiendo por tal la posibilidad de repetición ilimitada del o de los procesos transformadores implicados en ella, con certidumbre estadística definible y mensurable.

Es justo afirmar que el conocimiento actual del proceso de fabricación permite establecer "modelos" para éste. Implícitamente lo hacemos cuando, en plática entre cementeros, se citan caudales de producción, consumos de calor, etc., referidos a un tipo de fábrica equipada, p. ej., con horno, intercambiador, enfriador dados.

Aceptada la posibilidad de un "MODELO DE PROCESO" queda abierta la posibilidad de establecer la "calidad de realización del proceso", refiriendo al "MODELO" los resultados conseguidos durante el curso de la producción, en el contexto concreto de la instalación para la que es válido el "MODELO". Exactamente lo mismo que practicamos en el control del producto obtenido.

A mi entender, para cada fábrica dada, equivalente a decir para un grupo humano operante sobre un equipo fabril, materias primas, combustible, etc. dados, el "MODELO DE PROCESO" consiste en afirmar, con certidumbre estadística aceptable, que debe de ser logrado:

(I) Un CAUDAL DE PRODUCCION entre los valores  $P_1-P_2$  (expresado en la unidad que se quiera)

por aplicación de:

(II) { CAUDAL DE MATERIAS PRIMAS, en cantidad entre  $M_1-M_2$   
 CAUDAL DE COMBUSTIBLE, en cantidad entre  $C_1-C_2$   
 CAUDAL DE ENERGIA ELECTRICA, en cantidad entre  $E_1-E_2$   
 TRABAJO HUMANO, en cantidad entre  $H_1-H_2$   
 ETC., ETC.

Suponiendo que durante la realización del proceso ha sido posible regular su curso de forma eficaz, de modo que todas las variaciones con relación al MODELO, imprevisibles en el momento de su redacción y que tienen su origen en lo que con enfermismo solemos llamar "causas de azar", han sido corregidas rápidamente.

Como el proceso principal de nuestra tecnología (transmisión de energía térmica a distintos niveles de temperatura, soportada por una vena gaseosa desplazada a contracorriente del flujo de sólidos sometidos a proceso), puede hacerse preceptible el curso del proceso y, por tanto, la calidad de su realización mediante la captación de los valores que aceptan parámetros tales como:

(III) { TEMPERATURA  
 PRESION  
 CAUDAL DE GASES  
 CAUDAL DE SOLIDOS  
 ETC.

en puntos elegidos del trayecto recorrido por el sistema vena gaseosa/sólidos dentro del recinto delimitado espacialmente, p. ej., por el intercambiador, horno y enfriador.

El grupo (III) forma parte, y de modo esencial, del "MODELO" y como en los (I) y (II) es posible fijar intervalos

$$T_1-T_2 \quad ,$$

$$\pi_1-\pi_2 \quad ,$$

$$Q_1-Q_2 \quad ,$$

etc., para cada uno de ellos con seguridad aceptable, cuando se redacta el modelo de

proceso y que la recogida de datos durante su explotación permite reconsiderar con mayor rigor y veracidad.

Con ello, se obtiene que la realización del proceso ofrece la posibilidad de obtener información, de modo continuo, acerca del estado instantáneo de la realización del mismo a través de los valores  $T - \pi - Q$ , etc., y gracias a tal información, se obtiene también la posibilidad de actuar adecuadamente sobre el curso ulterior del proceso, si el sistema se desvía de las condiciones presupuestas en el "MODELO DE PROCESO".

Esta posibilidad de reajuste del proceso a lo largo del tiempo es lo que nos ha sugerido que, en otra ocasión (XXXVII CONGRESO INTERNACIONAL DE QUIMICA INDUSTRIAL, MADRID 1967), hubiéramos puesto en relieve (en RAZON y SER de la FABRICA) su rudimentaria analogía con el proceso denominado "homeostasis" en los seres vivos.

Cada tecnología de producción realiza la captación, transmisión y entrega de INFORMACION en la forma que le es más adecuada; pero en todos los casos en forma de "mensajes" individualizados, producidos en esos puntos escogidos "ad hoc" en la línea de realización del proceso.

Los "mensajes", expresados en el lenguaje de las escalas graduadas o de los impulsos eléctricos, son recibidos y traducidos por personas humanas o por dispositivos muy diversos, concatenados o no en un sistema, respectivamente, los cuales, según un código o programa elaborado "a priori", deciden, como consecuencia del mensaje recibido, el modo más conveniente de actuar sobre el curso ulterior del proceso.

Puede afirmarse, por tanto, que sobre el desarrollo del proceso básico de producción, se superpone otro de producción, transmisión y utilización del "caudal de información", representado por el conjunto de mensajes engendrados en la realización del proceso mismo.

Más arriba ya hemos indicado que los parámetros (III) de la definición del MODELO se presentan habitualmente como intervalos entre dos límites fijados "a priori". Lo mismo es válido para las partes (I) y (II) del modelo. Sin embargo, era de esperar, y lo prueba claramente la experiencia, que la frecuencia de aparición de cada uno de los valores encerrados dentro del intervalo asignado para cada parámetro, no es la misma.

A lo largo del tiempo, cada parámetro ofrecerá cierta distribución de frecuencia de aparición de los valores correspondientes a la subdivisión del intervalo total asignado a aquél, de tamaño coherente con la exactitud esperable del sistema de captación, transmisión y lectura.

La representación gráfica de tal distribución, de frecuencias de aparición de cada valor, es el, tan ampliamente utilizado en Estadística, histograma de intervalos de clase.

Utilizando los histogramas obtenidos ofrecen aspectos distintos tales como los (A) o (B) de la figura 1, claramente diferenciables.

Si introducimos, como hemos hecho en la figura, la condición de que la suma de las frecuencias obtenidas para cada intervalo de clase sea 1, e identificamos la frecuencia con la probabilidad de aparición del mensaje en un determinado intervalo de clase, puede ser caracterizado cada tipo de histograma o de distribución de probabilidades de ocurrencia del mensaje, mediante la definición de Shannon:

$$(-P_1 \cdot \log_a P_1 - P_2 \cdot \log_a P_2 - P_3 \cdot \log_a P_3 - \dots - P_n \cdot \log_a P_n) = H_a ,$$

que él denominó entropía de grupo de probabilidades y designó con la letra  $H_a$ .

La función  $H$  es por definición *positiva*, pues cada frecuencia  $P$  es menor que 1, y por tanto su logaritmo, en cualquier sistema, es negativo.

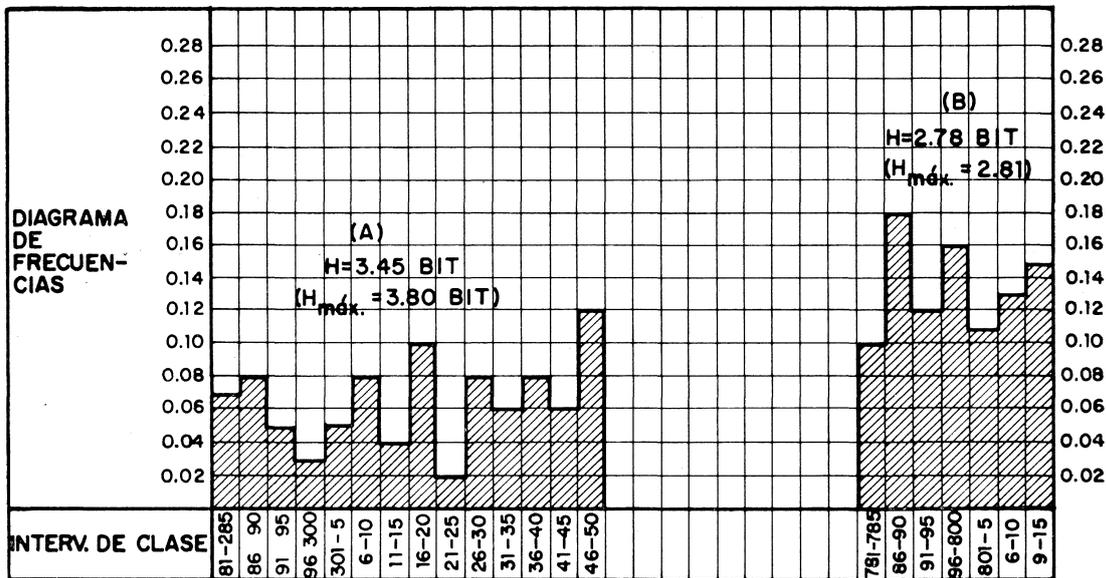


Fig. 1

La función  $H$  alcanzará su máximo valor cuando la frecuencia para cada intervalo de clase sea la misma; en este caso:

$$H_{\max.} = \log n.$$

Siempre dentro de la hipótesis de que la suma

$$\sum_1^n \frac{P}{\pi} = 1,$$

el grupo de probabilidades con amplio intervalo y distribución dispersa significa un valor de  $H$  más alto que cuando el intervalo es menor.

Es habitual obtener  $H$  utilizando logaritmos del sistema de base 2. Los valores obtenidos para

$$\sum_1^n (P \log_2 P) = H_2$$

quedan expresados en BITS de información. Cuando se utilizan logaritmos de base 10, puede pasar a BITS multiplicando los valores obtenidos por 3,3219.

Así, cuando un mensaje permita al receptor que modifique su estimación de lo que va a ocurrir pasando de un grupo de probabilidades según la distribución de tipo (A) a la de tipo (B), puede decirse que la información del receptor ha aumentado en la misma cantidad en que se diferencian las entropías  $H_B - H_A$  de las dos distribuciones.

Nuestra incertidumbre ante un termómetro, antes de leerlo, está medida por la  $H$  correspondiente al grupo de probabilidades que representa el curso de sus indicaciones a lo largo del tiempo.

Por tanto, en este sentido, todos los “mensajes” no son equivalentes.

El conocimiento de los valores simultáneos de los parámetros del grupo (III) ofrecerá el máximo de su eficacia, desde el punto de vista del control de fabricación, cuando por la información aportada al receptor pudiera fijar éste un valor concreto único para por ejemplo el caudal de producción del horno, lo cual significaría que, gracias a la información recibida, el grupo de probabilidades que representa gráficamente el curso de la producción del horno, caracterizada por el histograma ( $P$ ), habría pasado a quedar representado por el  $P_1$  o  $P_2$  (fig. 2) y, por tanto, si como en  $P_2$  no es el deseable, le llevaría a actuar sobre el sistema de regulación del proceso para conseguir otro más adecuado.

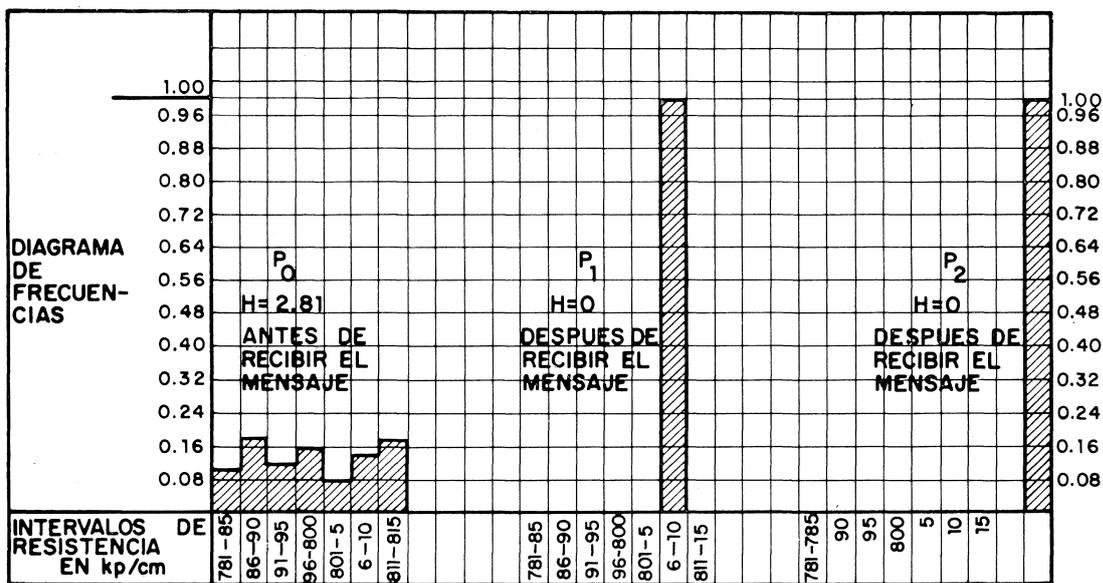


Fig. 2

Si nuestro modo de enjuiciar es correcto, el “control de realización del proceso” consiste en evitar que, refiriéndonos, por ejemplo, al caudal del horno, que la entropía ( $H$ ) de Shannon para la distribución de probabilidad de su producción, no aumente gracias a la información aportada por todos los parámetros medidos, cuyas distribuciones de probabilidad podemos establecer y ponderar a los efectos de control a nivel humano o automatizado total o parcialmente.

Para nosotros, la automatización en su esencia, con todas sus maravillosas realizaciones, trasladada las posibles decisiones basadas en la información recibida de una persona a un dispositivo cuya “entrada” está constituida (en ambos casos) por él o los mensajes recibidos y cuya “salida” está representada por el “mensaje” enviado al mecanismo, también complejo, regulador.

La elección de automatización total o parcial implicará, de modo indudable, la ponderación de la influencia de diversos parámetros, económicos financieros y tecnológicos, cuya recíproca influencia dará lugar a la determinación del óptimo exigido, visándolo siempre desde el ángulo de su significado económico global. Nuestro contacto con realizaciones de este tipo sólo alcanza al habido con la fábrica de Amöneburg de DYCKERHOFF ZEMENT-

WERKE, de reciente renovación y sólo parcialmente automatizada, con resultados de explotación excelentes.

En la parte que nos afecta como técnicos operantes en la industria española del cemento ante la toma de contacto de nuestro país con el tema de la automatización posible de nuestras fábricas, nos sentimos comprometidos a aportar todo el caudal de nuestra experiencia, sin duda valiosa, como base de partida para el trabajo de los técnicos especialistas en el planteamiento y solución del tema de la automatización.

El cúmulo de datos recogidos, aportados por los "mensajes" recibidos durante años, su definición estadística, la distribución del grupo de probabilidades, el estudio de las correlaciones, etc., creemos que significan una colaboración ponderable.

Y para justificar los puntos de vista que acabo de exponer, vais a permitirme que reproduzca aquí los resultados obtenidos en mi intento de hallar una función que, incluyendo valores recogidos de uno o varios parámetros determinados en el curso del proceso, permitiera determinar con aproximación suficiente el valor de:

$$\frac{K}{F} = \frac{\text{Clínker obtenido}}{\text{Combustible aplicado}}$$

o sea, una característica definidora de un sistema fabril concreto (valor proporcional al inverso del consumo específico de calor).

Largas horas de tedioso trabajo de elaboración de datos y de estudio de correlaciones entre diversos parámetros, me han llevado a la obtención de la ecuación:

$$\frac{K}{F} = \frac{a \cdot \lambda \cdot \text{CO}_2 - b}{\alpha \cdot c (1 - \text{CO}_2) \text{CO}_3''} \quad [I]$$

$a$  = Gases "secos" (en  $\text{m}^3\text{N}$ ) obtenidos por combustión perfecta de 1 kg de combustible.

$b$  = Anhídrido carbónico ( $\text{m}^3\text{N}$ ) por combustión perfecta de 1 kg de combustible.

$c$  = Anhídrido carbónico ( $\text{m}^3\text{N}$ ) por descarbonatación del crudo necesario para obtener 1 kg de clínker.

$\text{CO}_3''$  = Contenido en carbonatos (calcimetría) del crudo.

$\alpha$  = Coeficiente que ha de englobar particularidades locales (p. ej. influencia de pérdidas de polvo en el enfriador, humedad del crudo).

$\lambda$  = Dilución (1).

$\text{CO}_2$  = Anhídrido carbónico "seco" } ambos medidos en los gases finales del proceso, es decir, al final del intercambiador de calor, si lo hubiera.

$$(1) \quad \lambda = \frac{1}{1 - 3.762 \cdot \frac{\text{O}_2 - \frac{\text{CO}}{2}}{\text{N}_2}} \quad \left. \begin{array}{l} \text{O}_2 \\ \text{CO} \\ \text{N}_2 \end{array} \right\} \text{Determinados en el ensayo ORSAT.}$$

Experimentalmente aplicada sobre una muestra

$$N = 104,$$

de la producción en un horno en explotación normal, y extendida a una gama amplia de situaciones de caudal de aquél, obtuvimos para la correlación entre los valores de

$$(x) \frac{K}{F} = \frac{\text{Clínker obtenido deducido de pesada del crudo}}{\text{Fuel aplicado y medido en el contador del horno}},$$

$$(y) \frac{10\lambda \cdot \text{CO}_2 - 1,5721}{0,3408 (1 - \text{CO}_2) \text{CO}_3''}$$

la definición siguiente:

$$\tau = 0,7146,$$

$$\sigma_{\tau} = 0,05.$$

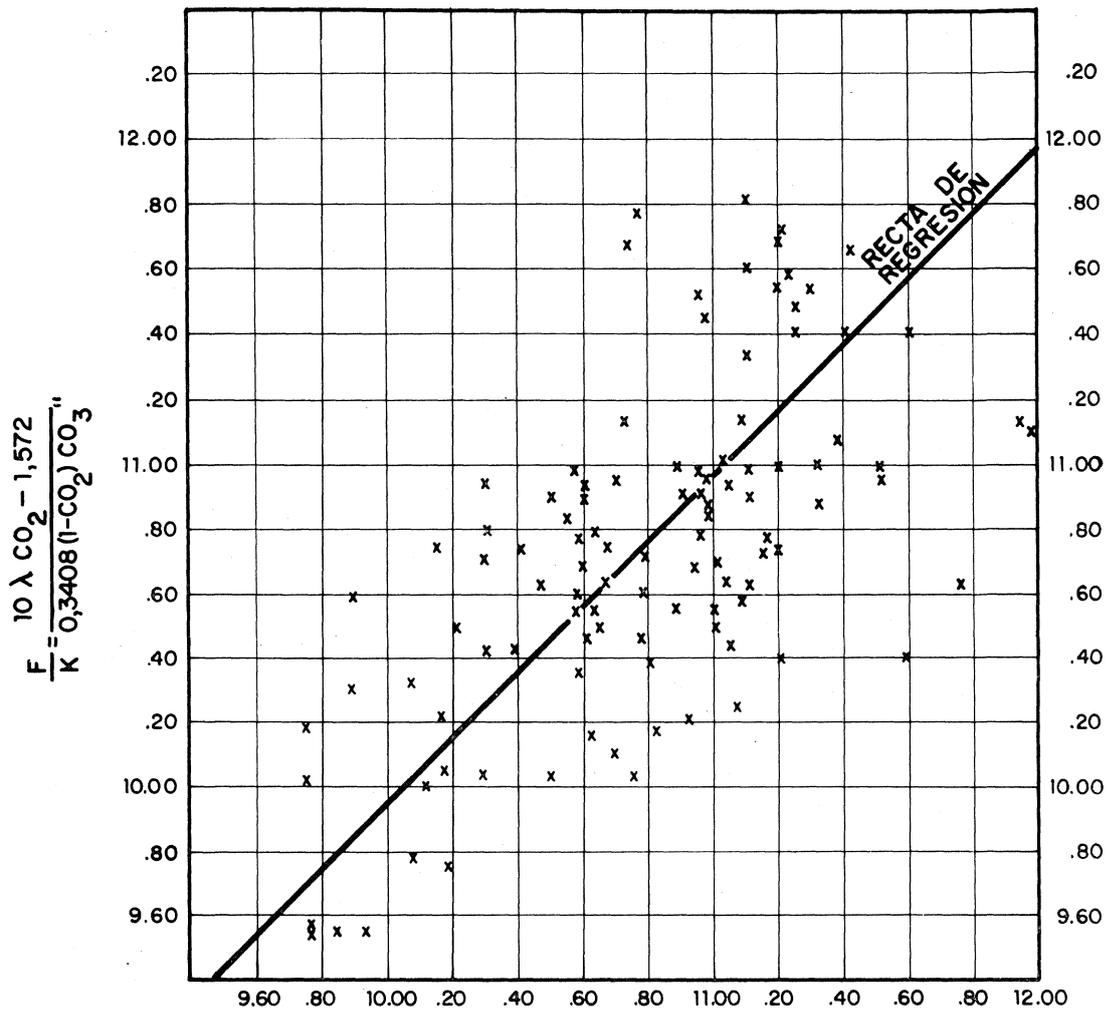
Es decir, fuerte correlación y francamente significativa.

En la figura 3 hemos recogido gráficamente la correlación descrita.

Las figuras 4 y 5 reproducen las distribuciones del grupo de probabilidades que ofrecen los parámetros  $\lambda$ ,  $\text{CO}_2$  como información adicional a nuestra ecuación, en los que hemos inscrito el valor de la entropía Shannon para cada uno de ellos, y también la dispersión que ofrecen con relación a una distribución normal.

La ecuación [I] naturalmente es susceptible de perfeccionamientos cuya introducción nos parece posible por estudio experimental de la influencia sobre ella del rendimiento térmico del enfriador, función a su vez del caudal y temperatura del aire secundario de combustión, en relación directa por su parte con el tiro en el cabezal del horno y con el volumen de gases introducidos en el enfriador, etc.

Aunque la fórmula [I] haya ofrecido gran atractivo para nuestra curiosidad, aparte de una buena herramienta en nuestro trabajo diario, solamente la hemos traído ante vosotros como muestra mínima de la posible colaboración que nosotros, técnicos del cemento, podremos brindar a los especialistas de la automatización cuando ésta comience a ser operante en nuestras realizaciones cementeras.



$$\frac{K}{F} = \frac{CRUDO (t)}{160} \times \frac{1}{FUEL (t)}$$

CORRELACION:

$$r = 0,7146$$

$$\sigma_r = 0,05$$

Fig. 3

RETICULO      PROBABILISTICO

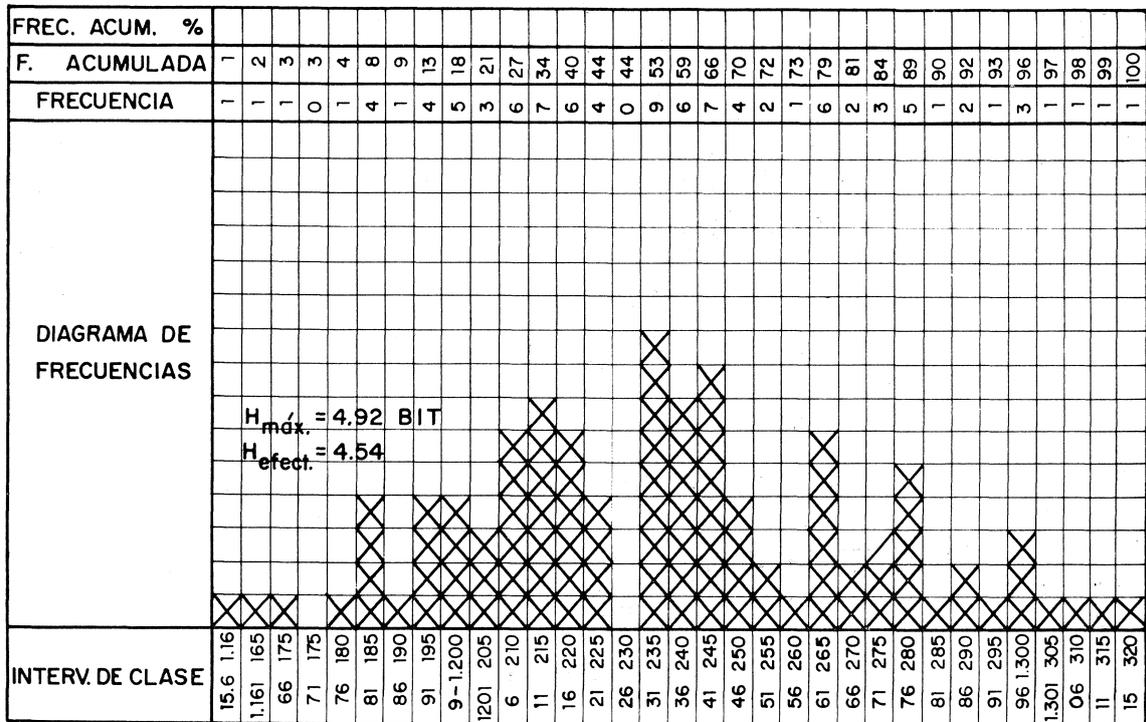
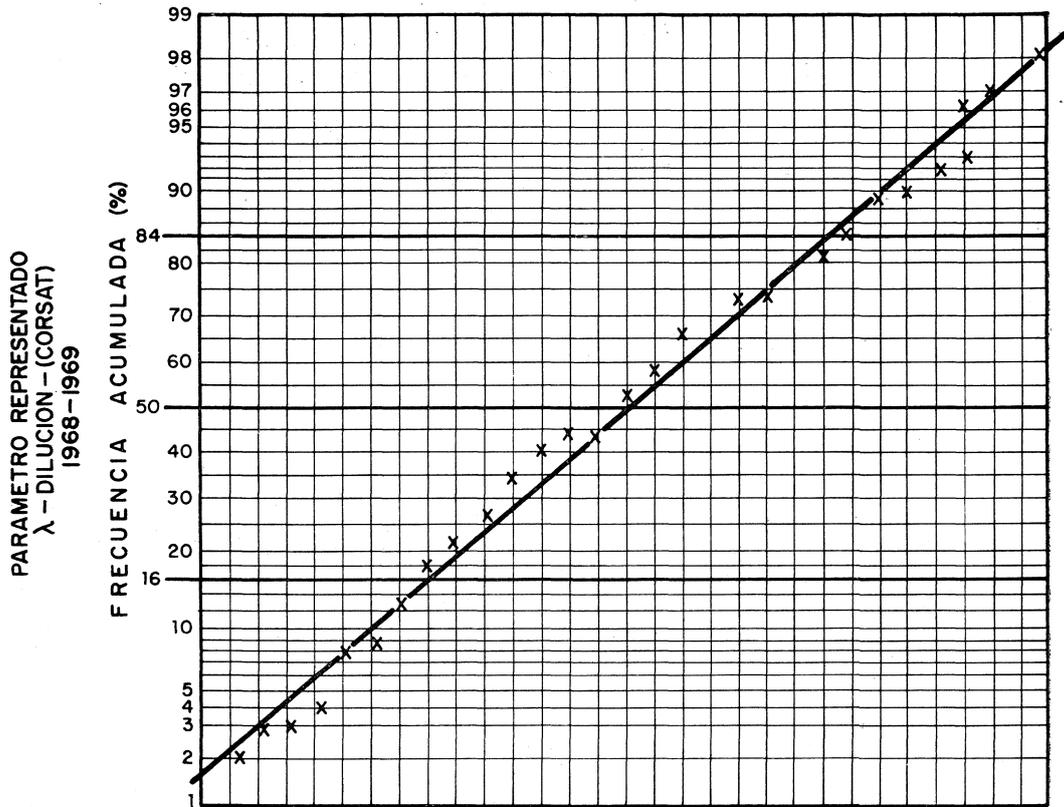


Fig. 4

PARAMETRO REPRESENTADO  
CO<sub>2</sub> (ORSAT) EN EL EXHAUSTOR  
DEL INTERCAMBIADOR  
68-69

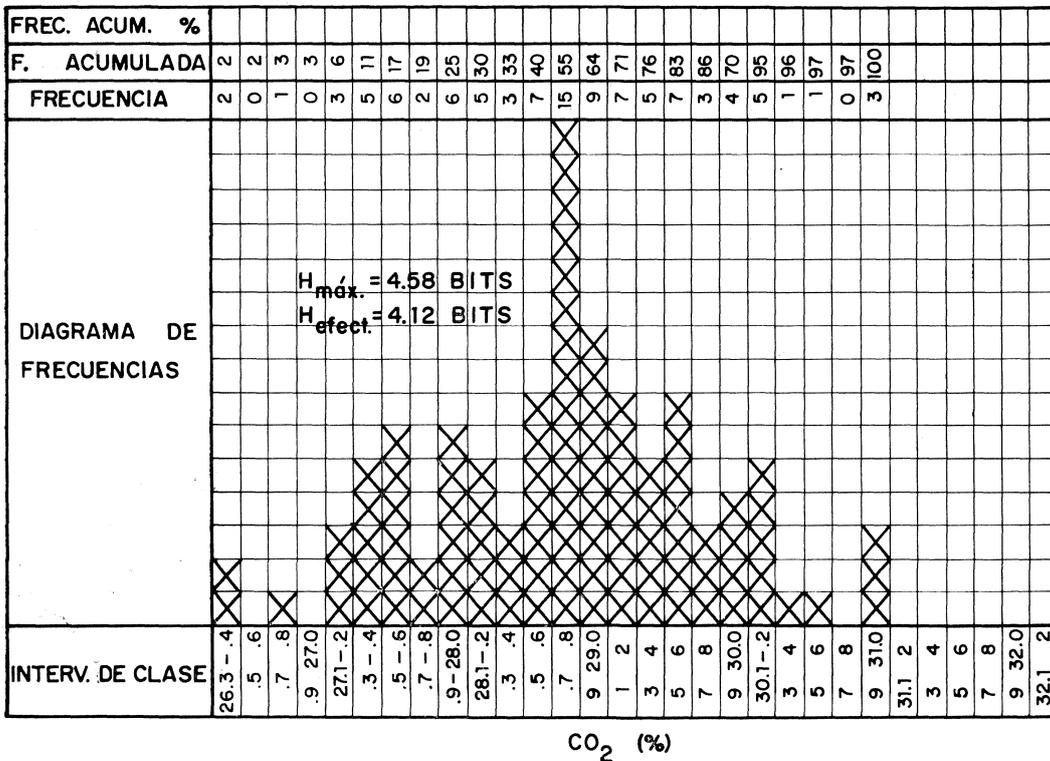
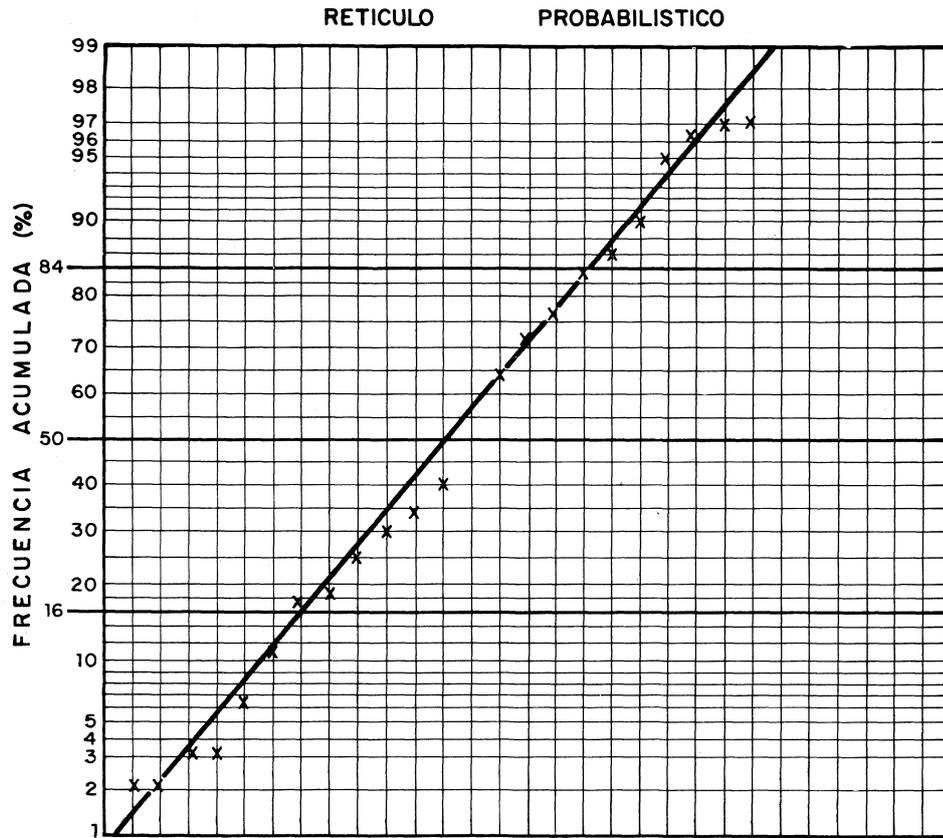


Fig. 5