

n. 6 #1 marzo 1956

Ingeniería Química

Revista Técnica e Industrial



Sala de Lectura
AUTORES ANTIQUINIA
Biblioteca General
U. de A.

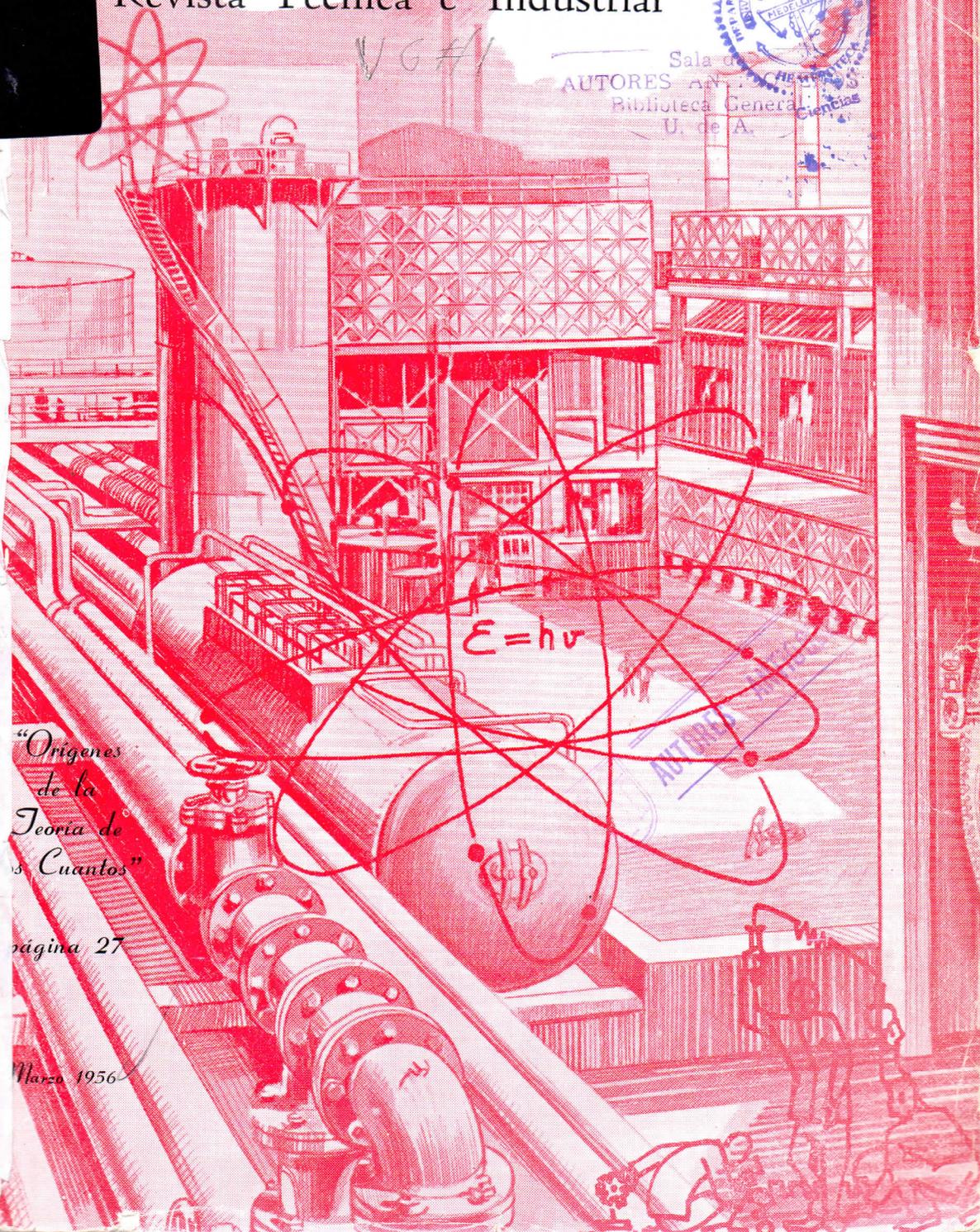
V.G.#1

$$E = h\nu$$

"Orígenes
de la
Teoría de
los Cuantos"

página 27

Marzo 1956



INGENIERIA QUIMICA

PUBLICACION BIMENSUAL

SUMARIO:

Comentarios	1
Informe especial: Instrumentación y Control Automático	3
Novedades I. Q.	10
Arenas para moldeo	11
Reportajes I. Q.: Habla el Dr. José V. de Fex, de Curtimbres de Itagüí ..	17
Un plástico sorprendente: El Teflón	21
Orígenes de la Teoría de los Cuantos	27

CARTA A NUESTROS LECTORES

Estimado lector:

Esta nueva etapa de la Revista INGENIERIA QUIMICA está asegurada por el optimismo que nos ha producido la gran acogida de nuestro número de Noviembre del año pasado, dentro del personal técnico y científico de la República. Esto para nosotros implica un gran estímulo que se traduce instantáneamente en el aumento de nuestro afán de ponerla a la altura de las mejores de América Latina.

El receso de una revista dirigida por estudiantes tiene su explicación. Al fin y al cabo los Directores dejan de ser estudiantes y se presenta, entonces, una crisis cada vez que esto sucede. Por otra parte la desconfianza de algunas empresas industriales y comerciales en la efectividad de la Revista como medio de propaganda, obliga al receso. Porque Ud. comprenderá que un órgano periodístico de esta índole necesita ser financiado con la publicación de propaganda comercial.

Podríamos demostrar nuestra popularidad como órgano divulgativo único en su género en el país y como medio informativo para el Industrial sólo sacando un centenar de las cartas que llegaron a la redacción de la Revista, pidiendo su publicación, y las que vinieron después a manera de felicitación y apoyo cuando nuestra Revista salió.

Además es bueno poner de presente la utilidad que reportará a la Industria Nacional el mantener vivo un órgano de divulgación de su sorprendente desarrollo y su verdadera valía ante el público colombiano y extranjero.

Fieles a nuestra consigna de presentar siempre lo mejor, le ponemos en sus manos este número extraordinario correspondiente a los meses de Enero-Marzo. Su contenido de alto valor científico y técnico y su presentación son el producto de ese afán de superación en que nos empeñamos y de la excelente dirección y dotación con que cuenta la Editorial de la Universidad de Antioquia.

Mucho le agradeceríamos sus comentarios sobre nuestras ediciones y esperamos que este número le agrade positivamente.

Cordialmente,

I. Q.

Sala de
AUTORES ANTIQUENOS
Biblioteca General
de A.

INGENIERIA QUIMICA

ORGANO DEL CENTRO DE ESTUDIANTES AL SERVICIO DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA.

DIRECCIÓN - GERENCIA
RAFAEL L. DE FEX

Apartado:
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Tel. 177-10

AÑO VII — Medellín, Marzo de 1956 — Volumen VI — Nº 1

Tarifa postal reducida — Licencia número 1718 del Ministerio de Comunicaciones.

La Dirección no asume responsabilidad por los conceptos emitidos por sus colaboradores.

COMENTARIOS

LA HIGIENE INDUSTRIAL EN NUESTRO MEDIO

En Colombia puede decirse, sin lugar a dudas, que los estudios realizados por el Servicio de Higiene Industrial, son los primeros en su clase verificados en una forma técnica. Su alcance está un poco distante de poder ser visualizado, especialmente a causa del escaso conocimiento que de ellos se tiene y de la resistencia pasiva encontrada en algunas empresas, quienes ven en este organismo sólo una institución que, dicen ellos, va a crearles problemas laborales y a entorpecer la marcha de su establecimiento.

No alcanzan a ver en el objetivo de estos estudios la representación clásica del ahorro humano y económico, el sacrificio de una necesidad presente por una necesidad futura; quieren y tratan de sacar del trabajador el máximo provecho lo más pronto posible.

“Máximo” provecho con un “máximo” de esfuerzo y un mínimo de probabilidades para él de alcanzar a vivir su vida media.

Es halagador ver cómo el industrial se preocupa por tener sus máquinas sincronizadas y perfectas interior y exteriormente. Es terrible ver cómo desentona con ellas la condición física y moral del operario; se cuida de la máquina reemplazable y se acaba con el cerebro que la dirige; la falta de estímulos emocionales los entorpece; la máquina les vale más dinero que la vida que se está perdiendo; además, entre nosotros, de las enfermedades ocupacionales son pocas las que reciben compensación, por causa de su sintomatología confunden la afección con otras consideradas como “naturales” y de

todos modos la compensación que les obliguen a pagar es menor que el costo de su apreciada máquina.

Naturalmente todos tenemos muy buenas intenciones y deseamos que esta situación se remedie, pero nos olvidamos que en nuestro país con mucha frecuencia "querer no es poder".

Hay que tener en cuenta que las enfermedades ocupacionales, como los accidentes, son evitables, tienen explicación pero no tienen justificación. Causan un gasto inmenso en compensaciones y demás costos adicionales que resultan de la ausencia del trabajador; además, y esto es muy importante, rebajan la dignidad humana, el sufrimiento del hombre que a causa de su afección se ve obligado a retirarse de su trabajo y de la satisfacción de ganar con el sudor de su frente el pan de su familia.

JAIIME MONCADA PÉREZ
Ingeniero Químico

COLOMBIA SE INDUSTRIALIZA

"El Gobierno Nacional, la Industria privada y los diferentes organismos departamentales vienen empeñados en un generoso programa técnico que tiende a darle una más amplia fisonomía económico-industrial, para que el país diversifique su producción y pueda disponer más ampliamente de divisas que lleven a darnos los elementos que complementen nuestra propia deficiencia".

Hernando Arellano A.
Presidente del Instituto Colombiano de
Ingenieros Químicos.

"Estoy convencido de que si Colombia continúa el mismo ritmo de desarrollo podrá convertirse antes de 20 años en el primer país industrializado de la América Latina".

Jacques Turfs
Experto belga del Comité Nal. de Planeación.

"Las posibilidades de industrialización son bastante halagadoras. Las medidas económicas del Gobierno, tendientes a eliminar la importación de artículos innecesarios, fijar cuotas apropiadas para la entrada de los elementos básicos para su desarrollo, el tratamiento preferencial para las materias primas, el fomento de las exportaciones por medio de las divisas negociables en el mercado libre y otras medidas similares han despertado en los industriales foráneos y nacionales iniciativas de diverso orden, que aspiran a satisfacer con nuestros propios recursos las necesidades del país.

Ingo. Pedro Vicente Ortiz
Gerente del Instituto de Fomento Industrial.



INSTRUMENTACION Y CONTROL AUTOMATICO

Por W. F. SHURIG, Ph. D.
Profesor de Ingeniería Química del
Polytechnic Institute of Brooklyn.

Este artículo es un resumen del curso sobre Instrumentación y Control automático dictado, durante el último semestre del año 1955, por el Dr. W. F. Shurig, del Instituto Politécnico de Brooklyn (Nueva York), en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Antioquia. El profesor Shurig diseñó los aparatos para el Laboratorio de Ingeniería Química de esta Escuela y para los laboratorios de la misma especialidad en la Universidad Nacional, en Bogotá y Universidades Centroamericanas. (N. de la R.)

La tendencia actual en la industria es hacia los procesos continuos, regulados automáticamente. Toda industria en la actualidad debe tener todo o alguna parte del proceso controlado automáticamente, ya que al Automatismo no se puede escapar nadie. Buscando mayor economía y mayor rendimiento en nuestras plantas por medio de él, nos estamos adentrando en la Segunda Revolución Industrial.

Control Automático de un proceso, es la operación que se efectúa al mantener tal proceso entre ciertos límites, a fin de que las condiciones normales provenientes de este control den como resultado un producto óptimo. Pero la gran importancia del Control Automático es precisamente el hecho de que en la operación de regulación se utilizan aparatos apropiados, cada día más perfectos, que disminuyen el riesgo del "ojo humano".

Los instrumentos industriales de hoy en día pueden efectuar cambios en el proceso mucho antes de que el ojo humano perciba la necesidad de hacerlos.

LAS VARIABLES

En todo proceso industrial se necesita el regulamiento de ciertos factores para que la producción marche como lo impone la teoría. Así por ejemplo, la temperatura, la presión, el pH, el flujo de flúidos y muchas otras variables, deben ser observadas y controladas para obtener un producto de consistencia, de color, de sabor y de tamaño especificados.

EQUIPO Y APARATOS

Al hablar de Instrumentación debemos considerar las siguientes partes:

1º) Equipo indicador o de medida.-Tales son por ejemplo: los termómetros, bulbos, resistencias eléctricas, etc. El aparato indicador es fiel a una ley física, contiene un elemento sensitivo y por medio de él indica una magnitud que se lee en una escala conectada al aparato.

2º) Equipo grabador.-Contadores de agua, contadores de energía, termómetros con tablero grabador, etc.

3º) Equipo de control.-Son por ejemplo, los termóstatos, los reguladores de presión. A estos aparatos llega la señal del elemento sensible y actúan corrigiendo, en el caso necesario, el factor de disturbio.

El éxito o fracaso de cualquier elemento medidor depende no sólo de la precisión con que pueda medir una variable del proceso, sino de lo rápidamente que pueda transmitir dicha medición al aparato de control, el cual trata de corregir la desviación. Esta acción se denomina *velocidad de respuesta*. Si el elemento sensible es lento en responder a los cambios de la variable regulada, o si sólo es sensible entre determinados límites, el aparato de control no puede producir la debida reacción. De ahí que la velocidad de respuesta y la sensibilidad sean factores de importancia en la escogencia de un buen instrumento medidor.

SISTEMAS DE CONTROL

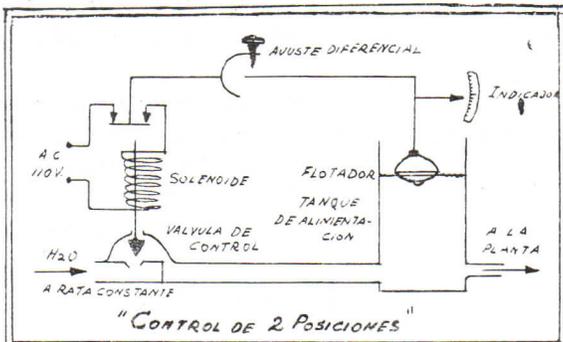
El regulador automático puede responder a los cambios del proceso, de diversas maneras, que dependen de como se haya construído su mecanismo interior.

El más sencillo de estos sistemas es el llamado CONTROL DE DOS POSICIONES, o también "on-off". En la figura 1A, se muestra un regulador de este tipo adaptado a un tanque de alimentación de agua. Se trata, en este ejemplo, de controlar el nivel del agua en el tanque a fin de conseguir una cabeza de presión constante. Siempre que el indicador de nivel se mantenga en el punto fijo de la escala esta presión será la misma.

Ahora, supóngase que por alguna razón el nivel baja; el flotador por consiguiente bajará, la palanca se elevará y hará contacto con el diferencial de ajuste en el yunk, el circuito eléctrico actuará para que la válvula deje pasar más líquido y se estabilice la presión.

Gracias a su sencillez, el control de dos posiciones tiene mucha aceptación y es a menudo suficiente para el control de un proceso cuyos cambios sean relativamente lentos.

Su principal desventaja es la siguiente: A medida que cambia la carga



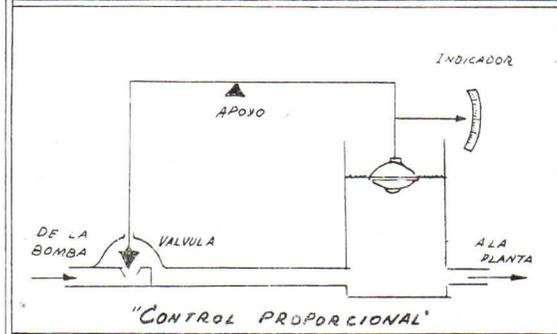
del proceso, el control "on-off" puede ocasionar que la variable regulada se desvíe sustancialmente de la cifra deseada, especialmente en procesos que exigen rapidez o grandes cambios.

A

CONTROL POR FLOTACION (Single Speed Floating Control)

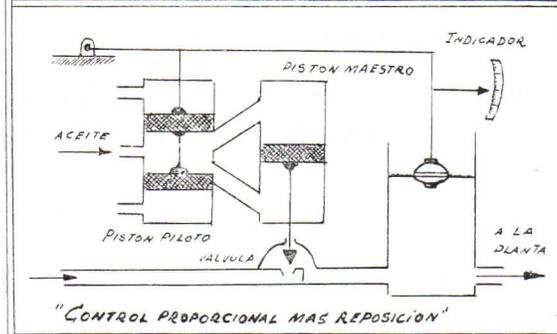
La diferencia principal entre el control de dos posiciones y el de flotación es que en este último, el elemento de control final se mueve gradualmente a una velocidad constante, hacia la posición abierta o hacia la posición cerrada, cuando el aparato regulador exige la acción. Por esto el control por

B



C

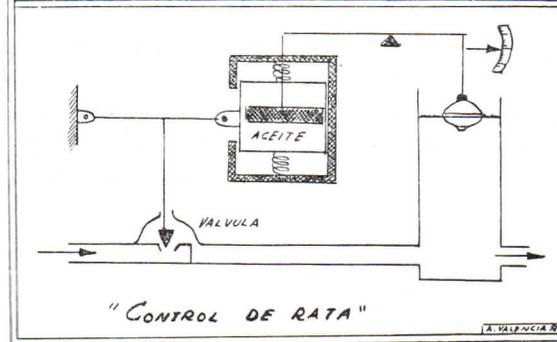
flotación permite una posición intermedia para compensar los cambios de la carga. Y de ahí, que sea fácilmente adaptable, a los procesos que tengan rápidos regímenes de reacción.



CONTROL PROPORCIONAL

D

En este tipo de control cualquier cambio en la variable regulada ocasiona un cambio proporcional e inmediato en



A. VALENCIA

el elemento regulador. De ahí que la válvula de control puede tomar un número indefinido de posiciones entre la cerrada y la abierta, dependiendo de los cambios en el proceso.

En la figura 1B se muestra un control proporcional; consiste en una palanca y un punto de apoyo, en su esencia. Se puede notar lo siguiente: a) cuando la válvula se mantiene fija, es porque la rata de salida es constante, b) cuando el flotador baja, la válvula se eleva. c) A un 100% de elevación la válvula debe entregar el 100%, y d) la posición del "apoyo" es de importancia capital.

Sin embargo, los cambios de carga hacen que el proceso se desvíe de su punto de reglaje.

CONTROL PROPORCIONAL MAS REPOSICION (Proportional speed floating Control-Automatic reset)

Este sistema es una combinación de los dos anteriores. Su característica es que compensa automáticamente los cambios de carga del proceso. Por lo tanto se puede usar en los sistemas en donde haya gran capacidad. Es el método más útil hasta ahora y se considera de gran importancia en aquellos procesos que requieran operaciones continuas.

Podemos observar la manera de actuar de este equipo de control en nuestro ejemplo de descarga de agua (Fig. 1C).

Aceite a presión entra en el juego de pistones "piloto" y está listo a entrar en el cilindro del pistón "maestro". Al bajar el nivel de agua, baja en forma proporcional el pistón piloto y deja al descubierto la abertura inferior del cilindro, por la cual el aceite a presión entra y sube el pistón maestro. La válvula se abre entonces a una velocidad constante.

CONTROL CON ACCION DE RATA (Rate mode of control -Pre act-)

Fundamentalmente el control con acción de rata puede superponerse a los otros tipos de que se ha hablado, para compensar la respuesta demasiado lenta del regulador. Proporciona una acción correctiva extraordinariamente grande, de modo que el elemento de control final se mueve todavía más. Depende de la rata de cambio de la desviación de la variable.

En la figura 1 D, podemos ver su principio de Operación: Al subir el flotador, el pistón, bastante libre de su cubierta, baja rápidamente, pero debido a la alta viscosidad del aceite de la caja el pistón arrastra consigo la caja y tiende a cerrar la válvula.

Al bajar la válvula, la rata irá disminuyendo; el flotador subirá a una rata menor. El aceite se sube por los lados del pistón.

Cuando las ratas de entrada y salida son iguales el flotador se estacionará. El resorte recobrará su posición y elevará la válvula.

CONTROL EN EL ESTADO FINAL

La tendencia más reciente es desarrollar sistemas que analicen continuamente la calidad del producto final y hagan correcciones en el proceso a base de dicho análisis. La medida del índice de refracción, de la conductancia eléctrica, de la conductibilidad térmica, etc., por medio de aparatos ultrasensibles conectados a mecanismos de control, dan solución a muchos problemas de destilación fraccionada, concentración, equilibrio de reacciones, etc.

Ahora es posible, entre otras cosas, coordinar los procesos continuos por medio de un espectrómetro de masas. Y desenvolvimientos posteriores han demostrado que es posible medir el número atómico de los flúidos que circulan por una tubería de cierto proceso industrial, registrando simplemente los cambios en la intensidad de radiación de un manantial radioactivo que atraviesa las tuberías.

POTENCIA OPERADORA

Debido a la poca fuerza desarrollada por el flotador, hay insuficiente potencia en la unidad de control para poner la válvula en la posición debida. Se hace necesario entonces, usar una fuente externa de potencia que mueva enérgicamente la válvula, al mismo tiempo que le permita estar localizada a alguna distancia de la unidad de control.

Se pueden utilizar estas clases de energía: la eléctrica, es ideal para grandes distancias, gran rapidez y puede conjugarse con los modernos instrumentos eléctricos y electrónicos, para formar un sistema completamente eléctrico; la energía hidráulica que por su parte se utiliza en sistemas pesados, en donde se requiera gran fuerza. Por último el manantial de energía más común es el aire comprimido o fuerza neumática. Por lo que se estudiará aquí únicamente.

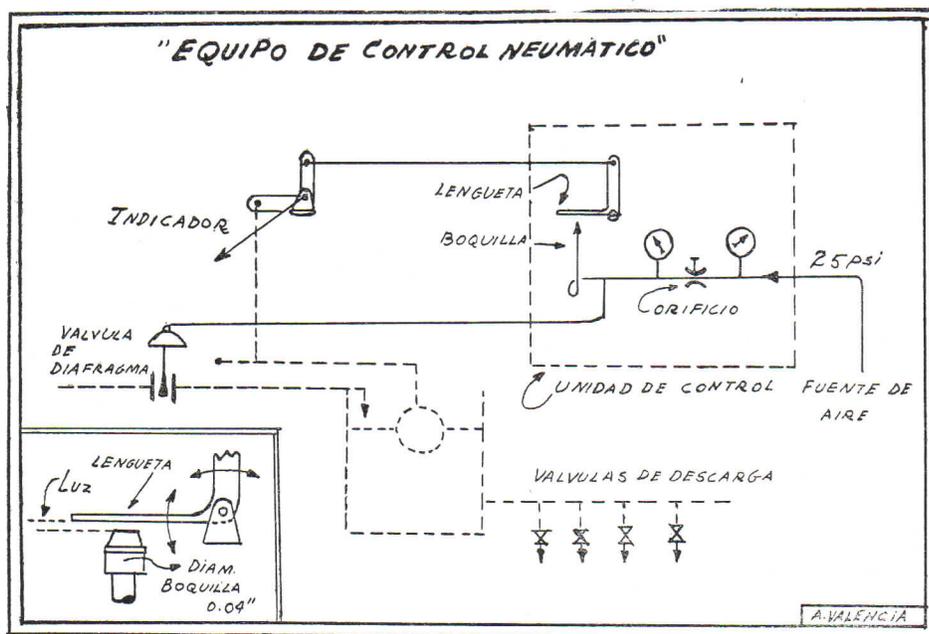
Tiene muchas ventajas y pocas limitaciones: poca inercia, fácil adaptación, el aire comprimido es limpio e inocuo y por lo general es una energía común en cualquier fábrica. Su acción se limita sin embargo cuando las condiciones atmosféricas son extremas o cuando la distancia es demasiado grande, caso en el cual se podrían usar servomecanismos eléctricos para relevo.

El primer paso en el diseño del equipo neumático es diseñar una válvula que pueda ser regulada por aire comprimido. Tal válvula podría ser la de diafragma.

Cuando la presión de aire se aplica encima del émbolo del diafragma el tallo baja y se abre la válvula. Un resorte calibrado para ceder a cierta presión, se coloca debajo del émbolo, de tal manera que mantiene la válvula cerrada a presiones insuficientes.

Lo siguiente a diseñar es un "modulador" de la presión del aire de acuerdo con la magnitud de la variable medida, en nuestro ejemplo el nivel del líquido.

Sabemos que al impedir el flujo del aire que sale por una boquilla causamos un incremento en la presión de ese aire dentro de la boquilla. Más aún, si oponemos a la salida del aire una lengüeta o laminilla liviana conectada por medio de palancas al elemento medidor, se obtiene el modulador pedido que hará variar la presión del aire en la tubería y por consiguiente el movimiento de la válvula en función del medidor.



En la figura 2, se ha alterado uno de los dibujos anteriores para incluir un aparato de control operado neumáticamente. Se incluye también un lápiz grabador, que dibuja sobre una carta rotante las variaciones del flujo.

Podemos observar: a) El aire entra de un compresor por el tubo A y luego pasa por un orificio R, de aquí a la boquilla.

b) Una ramificación del tubo que va a la boquilla está conectada a la válvula de diafragma.

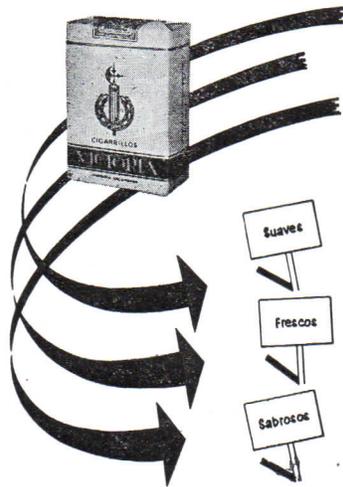
c) Una lengüeta o laminilla está localizada encima de la boquilla y se encuentra unida al grabador y al elemento medidor por medio de ligaduras y palancas.

El conjunto opera así: Al moverse el flotador causa el movimiento del lápiz grabador y de la lengüeta, que a su vez hace variar la presión interna del aire en la tubería.

Suponiendo que el flotador baje, por un descenso en el nivel del agua, la lengüeta bajará impidiendo un poco el flujo del aire por la boquilla. La presión entonces se aumentará hasta llegar a la necesaria para abrir la válvula del diafragma.

Si se ofrece el caso contrario, es decir, que el flotador suba, la lengüeta dejará salir más aire. La presión en la tubería caerá y por consiguiente el resorte de la válvula de diafragma se restaurará, cerrando herméticamente la válvula.

Por supuesto la respuesta de la boquilla necesita cierta amplificación, que se obtiene con un relay para aire, cuya descripción omitimos. Fuera de esto se usan diafragmas compensadores proporcionales y otros aditamentos para perfeccionar el regulamiento neumático.



NOVEDADES I. Q.

SE ESTA REDUCIENDO EL LARGO DE LOS HORNOS PARA CEMENTO

(Condensado de *Chemical Week*)

La Marquette Cement Mfg. Co., tendrá en funcionamiento a fines del presente año, un horno para cemento de sólo 165 ft de largo, diseñado y construído por Allis Chalmer.

El horno sorprende, no sólo por su tamaño sino por su economía de combustible. Usa el sistema de doble paso inventado por el ingeniero alemán Otto George Lellep, por lo que se denomina A-C-L (Allis Chalmer Lellep).

En un horno la eficiencia es proporcional al tiempo que el gas caliente permanece en contacto con el material para calcinar.

La manera más obvia de aumentar el rendimiento —el alargamiento del horno— ha sido tan socorrida que prácticamente algunos son un problema por su tamaño. Disminuyendo la rata de rotación del horno, también se aumenta el contacto, pero esto trae como consecuencia una mezcla pésima.

Lellep encontró una alternativa más satisfactoria: usar el gas caliente del escape para precalentar el material que va a alimentar el horno. También descubrió que una doble pasada de gas reducía la pérdida.

La ALLIS CHALMERS garantiza un consumo de 600.000 a 650.000 BTU por barril de cemento producido. Es decir, un 30 - 40% menos que el calor requerido por el proceso húmedo standard (1.1 millones BTU/barril) y por el proceso seco standard (900.000 BTU/barril).

SUSCRIPCION DE LA PRIMERA POLIZA DE SEGURO ATOMICO

(Condensado de *Chemie et Industrie*)

En Suecia se firmó recientemente un contrato entre la Compañía de Seguros SCANDIA y la Sociedad AB ATOMENERGI, empresa de carácter semi-oficial, para asegurar el reactor subterráneo que esta sociedad tiene en Estocolmo.

Además del seguro habitual contra incendio, explosión, daños de maquinaria, etc., la póliza contiene también cláusulas que comprenden lo siguiente: 1º - La pérdida de agua pesada y los desgastes causados por el derrame de esta agua. 2º - El daño causado a la instalación, a la pila de Uranio o al agua pesada en caso de que se produzca una reacción indeseable. 3º - El daño indirecto causado por la contaminación de la instalación por la radioactividad.

Investigaciones laboriosas y largas discusiones precedieron a la fijación de estas primas; y se ha establecido que los riesgos más serios son los daños por la contaminación radioactiva.

ARENAS PARA MOLDEO

Por GUSTAVO AGUIRRE M.
Ingo. Químico

Existen dos clases: Naturales y Sintéticas.

Las arenas naturales son las que se utilizan tal como se obtienen de los yacimientos. Tienen un contenido de arcilla entre 5 y 20%.

Las sintéticas consisten en arena lavada y de alto punto de fusión (1700°C) esencialmente silíceas (más de 98% de SiO₂) a las cuales, una vez tamizadas para obtener una regularidad en los granos, se les agregan los materiales necesarios. Debido a la uniformidad de propiedades que se pueden adquirir en este tipo de arenas, su empleo es casi universal, ya que una vez que se haya determinado mediante ensayos una mezcla satisfactoria, puede anotarse la composición para su empleo posterior.

Los aglomerantes son de varios tipos, a saber:

- 1º) Arcillosos: Bentonita, caolín.
- 2º) Orgánicos: Cereales, resinas, gomas, aceites.
- 3º) Inorgánicos: Cementos, silicatos.

Arcillosos:

Entre éstos, sin duda alguna, el aglomerante más usado es la Bentonita. Esta consiste en una sustancia arcillosa, formada por la descomposición de cenizas volcánicas y que absorbe un gran número de veces su propio volumen de agua, tomando aspecto gelatinoso.

Más adelante, al tratar sobre las propiedades de las arenas para molde se verá mejor el efecto de la Bentonita sobre éstas.

Orgánicos:

Se adicionan en cantidades no mayores del 2% por peso. Casi todos aumentan la resistencia de la arena y queman a bajas temperaturas.

Inorgánicos:

a) -Cemento Portland. En los últimos 50 años se ha venido usando cemento como material aglomerante, encontrando amplia aceptación en la industria de la Fundición.

Sus principales ventajas son:

1ª - Bajo costo.

2ª - Se obtienen superficies más duras y resistentes a la abrasión.

La desventaja principal es la de que imparte a la mezcla poca permeabilidad, dificultando así la evolución fácil de gases.

b) -Silicato de Sodio. Produce un enlace permanente que no quema a altas temperaturas, igual que el cemento, rebaja la permeabilidad de la arena y además baja considerablemente el punto de fusión de ésta.

PROPIEDADES DE LAS ARENAS PARA MOLDEO

Control de la arena.

Está comprobado que en la práctica de fundición se deben usar arenas y mezclas de arenas que hayan dado resultados satisfactorios por largos períodos de tiempo. De aquí, la importancia de llevar un control minucioso de todas las propiedades de las arenas, a fin de obtener una regularidad en ellas. Incluye este control de arenas, desde luego, la investigación de nuevas mezclas, y la estandarización de aquellas que muestren buenos resultados.

Las principales pruebas para las arenas de moldeo son:

1º - Tamaño de los granos.

2º - Humedad.

3º - Permeabilidad.

4º - Resistencia verde.

5º - Resistencia seca.

6º - Dureza.

Además pueden señalarse también:

a) - Gravedad específica.

b) - Contracción y expansión.

c) - Punto de Fusión.

d) - Deformación.

Tamaño de los granos.

Se determina por medio del análisis granulométrico, en tamices de la serie Tyler de la A.S.T.M. Su objeto es conocer el tamaño y distribución de las partículas. Diferentes distribuciones de granos cambian considerablemente las propiedades físicas de las arenas, así:

Una arena con un 20% de granos retenidos en la malla 20, un 30% en la malla 30, 30% en la malla 40, y 10% en las mallas 50 y 70, tendrá una gran porosidad y poca resistencia, dando lugar a penetración del metal.

Una arena con 60% de granos en la malla 50, 20% en la 40 y 20% en la 70, tendrá un gran coeficiente de expansión y producirá en la pieza una superficie áspera. Para obviar esto, debe agregarse a la arena un cereal (harina) o un material aglomerante para controlar la expansión. En este caso, la harina actúa como un "colchón" y amortigua la expansión.

Una arena con una amplia distribución en los granos como se ilustra a continuación, tendrá una gran cantidad de finos:

Malla	+ 20	=	2%
"	+ 30	=	5%
"	+ 40	=	8%
"	+ 50	=	10%
"	+ 70	=	20%
"	+100	=	20%
"	+140	=	10%
"	+200	=	5%
"	+270	=	20%

Esto trae como consecuencia, que la arena no mezcla bien, ocasionando en la pieza venas o fisuras. La permeabilidad disminuye y si la arena se apisona mucho ocasionará "soplados" en la pieza debido al aire y a los gases atrapados entre el metal y el molde.

La arena que presenta mejores condiciones de trabajo es aquella que muestra amplia distribución en los granos, pero que no contiene muchos finos. Por ejemplo:

Malla	+ 30	=	5%
"	+ 40	=	10%
"	+ 70	=	30%
"	+ 50	=	20%
"	+ 100	=	20%
"	+ 140	=	10%
"	+ 200	=	5%

Una arena de este tipo, se puede aglomerar fácilmente, retiene bien la humedad, requiere menos cantidad de aglomerante, tiene menos expansión y se deja trabajar fácilmente.

En conclusión, las mejores arenas son aquellas que presentan buena distribución de granos pero sin muchos finos y en forma tal, que la mayor parte de los granos (60-70%) quedan retenidos en tres mallas adyacentes, generalmente 40-50 y 70 o 50-70 y 100.

H u m e d a d.

————— La adición de agua a las arenas se hace con el fin de darles plasticidad y puedan así tomar la forma requerida.

Cuando la arena se moldea en exceso o con insuficiencia de agua, la superficie de la pieza vaciada no tendrá una apariencia satisfactoria.

El contenido de agua en las arenas y su efecto sobre las otras propiedades, se estudiará mejor en seguida, al tratar sobre éstas.

PROPIEDADES DE LAS ARENAS

Permeabilidad.

Es la medida de la capacidad que tiene la masa de arena moldeada para dejar pasar los gases a través de ella.

Se determina midiendo la rata de flujo de aire, que bajo presión constante, pasa a través de una muestra standard de 2 in. de alto por 2 in. de diámetro.

Se distinguen varias clases de permeabilidad a saber:

a) - *Permeabilidad base*: La que tiene una muestra de arena seca sin agentes aglomerantes.

b) - *Permeabilidad verde*: La que posee una muestra de arena húmeda y con agentes aglomerantes; corresponde a la mezcla de arena que se va a moldear y es la más importante.

c) - *Permeabilidad seca*: Es la de una masa moldeada de arena, que ha sido secada a 110°C. y enfriada a temperatura ambiente.

La permeabilidad está afectada por los siguientes factores:

1º - Distribución y tamaño de los granos. A mayor número de finos menor es la permeabilidad y viceversa. A mayor distribución de los granos mayor permeabilidad.

2º - Cantidad y clase del agente aglomerante. Generalmente a mayor cantidad de aglomerante menor será la permeabilidad. Sin embargo, esto depende también de la humedad de la mezcla, así: Cuando la humedad aumenta de cero, la permeabilidad aumenta hasta un valor máximo y luego disminuye al adicionar más agua.

CUADRO Nº 1

% H ₂ O	Permeabilidad con 2% Bentonita.	Permeabilidad con 4% Bentonita.	Permeabilidad con 6% Bentonita.	Permeabilidad con 8% Bentonita.
2	280	245	190	165
4	290	280	250	200
6	250	220	190	180
8	210	200	170	150

En el cuadro N° 1, se ilustran las variaciones de la permeabilidad verde con el efecto de la Bentonita, como aglomerante y de la humedad, sobre un cuarzo de una fineza American Foundry Association de 50:

Para el moldeo de acero, se acostumbra una arena de una permeabilidad mayor de 90, con el fin de permitir un rápido escape de los gases.

Resistencia verde a la compresión.

Es el máximo esfuerzo a la compresión (en lbs/in²) que resiste una mezcla recién preparada. Su valor indica que la mezcla se deja moldear. Generalmente los valores más aconsejables varían entre 4 y 8 lb/in².

La compresión verde depende principalmente de los siguientes factores:

a) - El aglomerante, su cantidad y distribución. - A mayor cantidad mayor resistencia, a mayor distribución mayor resistencia y viceversa.

b) - Tamaño de los granos. - La mayor resistencia se obtiene con granos grandes, presentan menor superficie que las arenas de granos finos (los pesos iguales), de modo que, para un porcentaje dado de aglomerante, los granos grandes se cubrirán con una capa más gruesa, la cual tiende a producir mayor resistencia. En los granos finos, el número de contactos entre éstos es mayor, lo cual también produce o contribuye a dar mayor resistencia.

De acuerdo con la distribución de los granos el comportamiento es el siguiente: Con amplia distribución de granos, mayor resistencia que con granos poco distribuídos.

c) - *Humedad.* - Cuando a partir de cero se aumenta la humedad, la compresión verde aumenta hasta un máximo y luego por adición de más agua, disminuye.

En el cuadro N° 2 se ilustra las variaciones de la resistencia verde a la compresión con distintas humedades, para un cuarzo de fineza A.F.A=50, aglomerado con bentonita.

CUADRO N° 2

% H ₂ O	Resistencia verde con 2% Bentonita	Resistencia verde con 4% Bentonita	Resistencia verde con 6% Bentonita	Resistencia verde con 8% Bentonita
1	—	—	—	—
2	1.5	3.0	3.1	5.7
4	1.6	3.1	4.7	6.6
6	1.6	3.0	4.8	6.3
8	1.5	3.4	4.7	6.6
10	1.5	3.0	4.0	6.0

Resistencia seca a la compresión.

Es el máximo esfuerzo a la compresión (en lbs/in²) que es capaz de resistir una mezcla de arena seca.

Depende principalmente de la cantidad de agente aglomerante y de la humedad. A mayor cantidad de aglomerante, mayor resistencia. A mayor humedad, mayor resistencia. Esta humedad corresponde a la inicial de la arena.

CUADRO N° 3

% H ₂ O	Resistencia seca lbs./in ² con 6% Bentonita	Resistencia seca lbs./in ² con 8% Bentonita
4	11	8½
6	19½	27½
8	36	40½

Dureza:

Es la resistencia que ofrece una mezcla de arena a la deformación. Está influenciada por los factores siguientes:

- a) - La resistencia de la arena. - A mayor resistencia, más dureza.
- b) - Tamaño de los granos. - A mayor número de finos menor dureza.

En moldes de una dureza muy baja, el metal deforma la cavidad del molde y con una dureza excesiva, se aumenta mucho la resistencia seca a la compresión y es mayor el peligro de que la pieza sufra agrietamientos.

Señor PROFESIONAL:

Inscríbase usted en el censo de los antiguos alumnos de la Universidad de Antioquia.

Hágalo ahora mismo.

Vincule su nombre a la construcción de los edificios para el Liceo Antioqueño.

“La Industria de Curtimbres en los EE. UU. ve en nosotros una futura competencia en el mercado latino - americano”

Declaró el Dr. José V. de Fex, Químico Director de Curtimbres de Itagüí, a uno de nuestros redactores.



Dr. José V. de Fex

—■—

Curtimbres de Itagüí es de las empresas más prósperas del país por el dinamismo de su Gerente, Dr. Juan Posada, y por el personal altamente técnico con que cuenta.

Con miras a seguir marcando la pauta dentro de la industria de curtumbre en Colombia, los directores de planta de Curtimbres Itagüí y Colombiana de Curtidos, de Bogotá esta última, doctores José V. de Fex y Leonidas Duque, hicieron durante los últimos meses del año pasado una gira de especialización por las diversas fábricas de cueros y materias primas para cueros de los Estados Unidos.

“INGENIERIA QUIMICA” ha querido dar a conocer a sus lectores los detalles de esta excursión por los campos de la industria norteamericana, para lo cual le hemos hecho al doctor de Fex el siguiente reportaje:

—Primeramente doctor, podría usted relatarnos su itinerario, a fin de que nuestros lectores se den cuenta de la magnitud de su gira?

—Con el propósito de abarcar un campo completo sobre la industria de cuero la Compañía fue amplia y se cumplió un itinerario dividido en dos partes: Visita a las fábricas manufactureras de productos químicos para la industria de cueros y a las fábricas en sí productoras de cuero. Fábricas de productos químicos como pigmentos, resinas sintéticas, anilinas, lacas nitrocelulosas, etc., se visitaron varias de importancia, pudiendo señalar como ejemplos a la Dupont en Wilmington, a Rohm & Haas en Philadelphia, a Bay State y Stahl Chemical Co. en Peabody, Mass.; productoras de sales de cromo para curtir, a la Diamond Alkali en Cleveland, grasas sulfonadas y emulsificadas, a la Morite en Boston, y muchas más que sería largo enume-

rar. Todas estas compañías recibieron nuestra visita con entusiasmo y mucho interés. En Rohm & Haas y en Dupont gastamos de a semana experimentando sobre los productos que fabrican en sus laboratorios.

Fábricas de cueros visitamos muchas, y aun cuando ellas ven en nosotros una futura competencia, fueron amplios en mostrar las fábricas y tuvimos oportunidades para hacer un balance comparativo con las nuestras aquí en Colombia.

—Qué concepto le merecen las fábricas que visitó y en general la técnica americana?

—Lógicamente se sorprende uno al entrar a un medio tan industrializado y en donde la técnica ha avanzado tanto. No puede sentirse otra cosa distinta sino sorpresa al comparar con lo nuestro, en donde los primeros pasos apenas se están dando. Para las fábricas americanas el factor tiempo es el fundamento; a ellos les vale más una hora de un obrero que un kilo de un pigmento. Su objetivo es mayor producción en menor tiempo. Nosotros aquí aún tenemos que pagar más alta la materia prima que la hora del obrero. Por ello son dos sistemas distintos, dos métodos diferentes. El aprovechamiento del trabajo del obrero es la parte fundamental y la mecanización es obligante. Son fábricas en donde las máquinas hacen hasta el 80% y el índice de producción hora-obrero-cuero es superiorísimo al nuestro en donde el obrero juega aún el papel principal.

—Después de haber visitado estas plantas, cuál es su opinión sobre la de Curtimbres en Itagiú y, a propósito de esto, puede explicarnos, doctor de Fex, la cuestión de la competencia con la industria norteamericana?

—Curtimbres de Itagiú, S. A., es muy conocida en los Estados Unidos en el mercado de cueros. Si a una pregunta le contesté que con recelo nos recibían por una futura competencia, le explicaré, ya que la pregunta de ahora es directa hacia la empresa donde sirvo de técnico: Nosotros estamos vendiendo mucho cuero en Centro América y hemos desalojado al cuero americano. Esto no dice que el cuero nuestro sea mejor, pero sí tiene cualidades superiores al americano para el uso en los países centroamericanos: Es más brillante y más suave. Aquí vuelvo a hablar nuevamente de la mecanización. La fabricación de zapatos tanto en Colombia como en la América Central se hace a mano, lo fabrica el zapatero del garaje alquilado; grandes fábricas apenas comienzan a establecerse. En Norte América todo el zapato se hace en máquinas. Ellos terminan el cuero en el zapato, aquí lo terminamos nosotros en la fábrica de cueros y debemos venderlo listo para que en el zapato no requiera más proceso. Ese es el beneficio del brillo; y la suavidad es buena para trabajarlo a mano. Estos factores hacen que nuestro cuero sea apetecido en Centro América. Técnicamente, en cuanto a procesos y habilidad industrial para sacar un buen cuero, no estamos

muy atrasados; nos llevan ventajas en rendimiento y capacidad de desarrollo. Da pena, pero nosotros aquí no tenemos un cuerpo de técnicos de laboratorios que investiguen y mejoren cada día el proceso de planta.

—El cuero americano aventaja nuestra técnica? Cree Ud. posible producir las diversas calidades de cuero americano en el país?

—Cuando hablamos de cueros necesariamente tenemos que hablar de pieles, y al mencionar pieles tenemos que decir que en Colombia no las tenemos, aquí lo que hay es un objeto lleno de nuches, garrapatas, rayones de alambres, de marcas, etc. Este tipo de piel da un cuero de muy mala clasificación aun cuando se haga todo lo posible en la técnica para dar una buena calidad. En los Estados Unidos tienen pieles de excelente calidad que ayuda mucho a obtener un buen cuero; allá disponen de becerros que nosotros no conocemos. En Colombia un animal se lleva a los mataderos de 5 a 6 años, cuando ya comienza a tener una piel no muy apta para los cueros finos, mientras que en Estados Unidos y en Europa el animal se ceba para que de dos a tres años esté en magníficas condiciones para sacrificar y su piel sea apetecida.

La técnica del cuero, fuera de pequeños detalles que no afectan el grueso de la producción, es conocida aquí en Colombia, y me atrevo a decir que estamos en capacidad de producir un cuero tan bueno como el americano, haciendo siempre la salvedad de los becerros y en general de las pieles pequeñas que aquí no tenemos. Como ejemplo le diré que Curtimbres importa un poco de pieles americanas y con ellas se hace un cuero de excelente condición.

—Qué novedades en maquinaria, materiales y acabado se van a implantar a raíz de este viaje?

—Se están estudiando ciertos tipos de cueros especiales que podrían tener aceptación en Colombia. Aquí es muy difícil introducir en el mercado nuevos productos, porque se tiene que comerciar con el zapatero remendón, muy reacio a cambios. Sin embargo, ya en el mercado hay unas tres variedades que van siendo aceptadas. Tenemos trabajando con buenos resultados una nueva máquina, llamada Pasting, que da un magnífico cuero con muchas ventajas sobre los otros tipos que hasta ahora hemos venido produciendo.

—Díganos sinceramente, doctor: Cree Ud. que los plásticos y los productos sintéticos en general, desplazarán al cuero de su uso doméstico e industrial?

—Los plásticos han sido siempre mirados con temor por los industriales de cuero, pero todavía la producción de cueros no ha mermado por el incremento del plástico; lo que pasa es que más cosas se están forrando hoy que antes. En el ramo de zapatería se ha aumentado la producción y

se seguirá aumentando porque para eso el cuero es insustituible. Para muebles, todavía cuando le quieren elogiar un artículo y le dicen "es forrado en cuero", es la belleza y la finura lo que se elogia; en plástico dura poco, en cuero es eterno y siempre será nuevo.

Quiero aprovechar la oportunidad para manifestarles mi simpatía por su publicación. La conozco y tiene fama por sus artículos de verdadero interés.

Nos despedimos del doctor de Fex agradeciéndole la deferencia para con nosotros al ocupar una parte de su valioso tiempo en nuestro reportaje.

"El éxito logrado por la industria nacional es fruto de dos hechos de igual importancia: la habilidad, consagración y esfuerzo de nuestros hombres de empresa, y el ensanche de actividades que la industria colombiana ha venido haciendo a medida que aumentan las posibilidades económicas y que sus balances mejoran".

"El Colombiano". Feb. 26/56.

QUIMICAS UNIDAS LTDA.

(antes DIQUICOL LTDA.)

Medellín, Bogotá, Barranquilla, Cali



Colorantes, productos químicos,
completo servicio técnico,
al servicio de la Industria Colombiana.

UN PLASTICO SORPRELENDE: EL TEFLON

Por HUGO GUERRERO L.
Alumno de último año.

HISTORIA Y DESCUBRIMIENTO.

Por muchos años, los químicos estuvieron tratando de encontrar nuevos plásticos que pudieran resistir el ataque de ácidos, álcalis y otros reactivos, que rápidamente destruían los productos sintéticos conocidos. Buscaban plásticos que pudieran resistir altas temperaturas sin fundirse, carbonizarse o explotar a la llama; y que pudieran ser expuestos a temperaturas por debajo de cero, sin volverse quebradizos o romperse en pedazos.

Al mismo tiempo, buscaban nuevos plásticos con propiedades eléctricas y mecánicas superiores a la de los productos conocidos, y que pudieran emplearse donde los viejos plásticos habían fallado antes.

En 1930, después de muchos años de investigación, esos materiales comenzaron a ser una realidad. Nació entonces un nuevo grupo de polímeros muy diversos: los plásticos del Fluor.

A la vanguardia de los investigadores se encuentran Roy Plunkett, de Du Pont, y William Miller, de la Universidad de Cornell. Sus trabajos, conducidos independiente pero simultáneamente, agotan casi por completo la investigación que sobre química de los plásticos del fluor se ha hecho en estos últimos años.

El descubrimiento del Teflón se remonta al año 1938, cuando el Dr. Plunkett, recién salido de los claustros universitarios, fue encargado de la investigación de nuevos refrigerantes que contenían fluor. Entre los muchos reactivos almacenados en el laboratorio estaba el tetra-fluoro-etileno (gas a presión ordinaria). Por casualidad el Dr. Plunkett descubrió un día que, aunque todo el tetra-fluoro-etileno había sido descargado de uno de los cilindros de almacenamiento del gas, el cilindro pesaba más que cuando estaba lleno.

Habiendo partido el cilindro, el Dr. Plunkett encontró incrustada, en la parte interior del cilindro, una capa gruesa de un sólido denso y blanco, que al tacto parecía casi exactamente como la cera. Sin embargo el nuevo material era completamente diferente, pues era capaz de soportar un cambio apreciable de temperatura, a pesar de la exposición a todos los más poderosos agentes corrosivos conocidos. Pero, aunque el descubrimiento del Teflón fue hecho por el Dr. Plunkett, los trabajos de perfeccionamiento y extensión de sus aplicaciones fueron realizados por otros. La mayoría son patentes de Du Pont. Citaremos algunos:

Método Walter Llewellyn. - Los nuevos compuestos de los polímeros y copolímeros del C_2H_4 , que son estirados por presión, recubiertos, cilindrados y moldeados, son obtenidos por suspensiones coloidales del polímero, que se coagulan y luego se mezclan con 15-30% de un hidrocarburo que tenga una viscosidad mínima de 0.45 centipoise a $25^\circ C$. y un punto de fusión por debajo de $100^\circ C$.

De esta manera, si una suspensión coloidal acuosa de politetrafluoroetileno se coagula por agitación rápida, la mayor parte del agua se remueve. 90.8 partes del coágulo restante se agitan con 9.2 partes de petróleo disuelto en C_6H_6 ; la mezcla se evapora a sequedad en baño de vapor durante toda la noche, el residuo se hace pasar por dos cilindros de molinada hechos de acero, para convertirlo en láminas de un espesor aproximado de 0.008 pulgadas. Esta lámina es luego calentada en un horno a $205^\circ C$. y después a 332° (se puede hacer directamente a $332^\circ C$.) y se obtiene una lámina delgada sumamente resistente y flexible usada como capa protectora para alambres conductores de alta corriente.

Otro método de la Du Pont. - John Lontzi y Lester Robb, emplean un proceso similar: Se mezclan 15-30% de un hidrocarburo alifático o cicloalifático saturado, que tenga un punto de ebullición de 220 a $400^\circ C$, con una suspensión coloidal de un polímero del C_2F_4 y se coagula luego la mezcla.

Este polímero se obtiene por polimerización de C_2F_4 en agua en presencia de Na, K, o sal de Na de un ácido como el heptanoico y un catalizador. 83 partes de agua y 66 partes de ME_2CO se agregan para coagular el polímero disperso. La mezcla se agita durante 3 minutos y el sólido se filtra por succión fuerte y seca a $110^\circ C$.

El secado es una sustancia suave, blanca, de apariencia granular, que es rápidamente estirado por presión, enrollado en un cilindro o moldeado. El lubricante residual de esta operación se remueve por extracción con tolueno, nafta, C_6H_{14} , etc.; o por evaporación. El artículo libre de lubricante es entonces fundido para obtener un material flexible y fuerte, calentándolo a temperatura superior a $327^\circ C$.

Comparación de propiedades físicas.

Los plásticos más pesados son los obtenidos de hidrocarburos fluorinados y entre éstos, uno de los más pesados es el Teflón.

El Teflón es la mejor resina para equipos en donde se usan sustancias corrosivas. Sólo es atacada por metales alcalinos fundidos y fluoruros a temperaturas y presiones elevadas.

Es resistente a los cambios bruscos de temperatura. Así, resiste perfectamente cambios de -68°C a 260°C . En forma de barras moldeadas solamente experimenta una pérdida de 1% en la fuerza de tensión, cuando está sometido a una temperatura de 249°C durante un mes.

Su alta resistencia al agua, asegura la retención de sus propiedades eléctricas, aun después de larga exposición a la humedad.

USOS.

— El Teflón se usa en la fabricación de empaques para aparatos de mecánica, cheques para bombas, válvulas de asiento, diafragmas, pistones para bombas, en la fabricación de tubos para cañerías y aislantes eléctricos para cables de alto voltaje.

Debido a su baja resistencia eléctrica, bajo factor de pérdida dieléctrica y absorción de agua cero, los fluoroplásticos han tomado un lugar prominente en la industria eléctrica. El mayor uso está en la fabricación de recubrimientos para alambre magnético, aislantes para cables y soportes para antenas de televisión.

También se usan en la fabricación de correas conductoras de materiales pegajosos y en los rodillos y otros componentes de maquinaria de panadería.

En los últimos años se le han encontrado nuevas aplicaciones al Teflón. En el laboratorio, en la fabricación de tapones y revestimientos para recipientes, que puedan resistir el ataque químico. En las plantas, para fabricar válvulas resistentes a la corrosión que eliminan completamente el contacto de metal a metal, y al mismo tiempo no requieren lubricación; también en la fabricación de válvulas de diafragmas y revestimientos que contienen grafito, asbesto, o ambos.

En un futuro no lejano, el Teflón se podrá aplicar en la fabricación de impulsores para bombas, en tuberías en combinación con fibras de vidrio, con lo cual se obtendrá no sólo más resistencia, sino también menos fragilidad.

En etapa de experimentación se halla la aplicación del Teflón como pigmento en una gran cantidad de colores.

OTROS ASPECTOS.

— En la fabricación del Teflón y los plásticos congéneres se han presentado algunos problemas que no han sido solucionados todavía: De qué manera se puede acelerar la polimerización de los materiales al comienzo de la reacción y cómo se puede controlar exactamente las ratas y la extensión de la polimerización.

Se ha tratado de solucionar este problema usando algunos iniciadores de la polimerización como H_2O_2 , persulfato de sodio y peróxidos orgánicos.

Las investigaciones se encaminan a mejorar las propiedades del polímero crudo y al mismo tiempo, a simplificar su conversión al producto acabado.

Uno de los más significativos aportes de los fluoroplásticos en el desenvolvimiento de la Era Atómica, está en el uso que se hizo de ellos por la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos en la planta de Oak Ridge. Durante la guerra y en los años siguientes, el empleo cada vez más variado de estos plásticos se originó en las sucesivas exigencias del Ejército de los Estados Unidos y de la Comisión de Energía Atómica.

TECNICA PARA EL MOLDEO.

Cuando se va a moldear Teflón, el polvo granular debe pasar por un tamiz de 30 a 50 mallas, se comprime a presiones al rededor de 2.000 psia y luego se calienta a temperatura superior a 620°F. A esta temperatura el material cristalino se transforma en gel amorfo.

Esta técnica, similar a la sinterización de metales, tenía sus limitaciones, pues el molde de los productos del Teflón debía circunscribirse a formas muy sencillas.

Durante muchos años se trató de obviar esta limitación del Teflón y finalmente en 1949, Du Pont anunció el descubrimiento y aplicaciones de dispersiones acuosas de Teflón, un hecho que muy pronto abrió un inmenso e insospechado campo en el uso del prometedor fluoroplástico.

Con esas dispersiones, que contienen aproximadamente 50% de Teflón, era posible formar sobre superficies sólidas una capa de fluoroplástico con un espesor cercano a 0.0015 pulgadas.

Entre los nuevos e importantes usos de estas dispersiones están el recubrimiento de objetos de vidrio que no deban romperse o volverse quebradizos, aun cuando se les someta a temperaturas por debajo de 30°F. Corrientemente tales artículos se emplean como aislantes en sistemas eléctricos.

También se usan tales dispersiones en la fabricación de las llamadas "Cintas flouoroplásticas", de importancia en la industria química y eléctrica como material de empaque y como enrollamiento aislante en motores, generadores y cables eléctricos.

Aunque el empleo de estas dispersiones ha sido estudiado muy cuidadosamente, quedan algunos problemas técnicos por resolver. Así, por ejemplo, esos polímeros podrían llegar a ser de considerable valor en la industria química como agentes resistentes a la corrosión para calderas de reacción, si fuera posible encontrar la manera de mejorar los métodos de aplicación y las propiedades físicas y químicas de las películas de fluoroplásticos, aplicadas al interior de grandes recipientes. La limitada elasticidad

dad de ellos está siendo resuelta en muchas aplicaciones especializadas: introduciendo un metal elástico en el mismo plástico.

Un inconveniente para el uso de estos compuestos es su precio. En 1944 el precio de una libra de Teflón era de 25 dólares y en 1952 había bajado a 5.55 dólar/libra. Es decir, demasiado alto comparado con los demás plásticos.

En muchas aplicaciones, sin embargo, el Teflón es mucho más barato que cualquiera otro material de construcción, debido a que es más durable, lo cual hace posible un mínimo en el gasto de mantenimiento.

Queda mucho por descubrir en este campo y la última palabra sobre estos plásticos revolucionarios todavía no se ha dicho. Bien lo dice la Revista "Chemical and Engineering News: "La rápida aceptación de los fluoroplásticos, junto con sus usos potenciales casi completamente inexplorados, hacen de estos materiales estrellas de especial brillantez en la galaxia de los plásticos".



Curtimbres de Itagüí S.A.

MEDELLIN - COLOMBIA

Produce las pieles de más alta calidad
que se encuentran en el país

ESPECIALIDAD EN:

CANGURO, CHAROLES, IMPERMEABLES,
VAQUETAS PARA MUEBLES Y
TALABARTERIA

Cables y Telegramas: Curtitagüí

Apartado Aéreo: 970

Orígenes de la Teoría de los Cuantos

Por ANGEL ZAPATA CEBALLOS

— Tesis presentada para optar al título de Ingeniero Químico —
Presidente Dr. Hernán Gómez G.



Dr. Angel Zapata
Ceballos

La Teoría de los Cuantos, ha sido siempre un rompedero de cabezas para el estudiante común y para el amante de las ciencias con escaso conocimiento de las altas matemáticas que envuelve y necesita la ciencia Física.

Por esto consideramos que "Orígenes de la Teoría de los Cuantos", trabajo para optar al título de Ingeniero Químico presentado por el profesor Angel Zapata Ceballos, llena un vacío en la biblioteca del estudiante y el técnico universitario. Ya que es una exposición con fines didácticos de la teoría de Max Plank, teoría sobre la cual está basada la actual era nuclear.

Y aunque el autor, abusando de su humildad, no le concede mérito especial a su recopilación, nosotros podemos decir que el mérito del trabajo está, precisamente, en sacar de teorías tan supremamente incomprensibles para el hombre común, un extracto tan sencillo y científico, y al mismo tiempo tan lleno de amenidad, de esa amenidad en el estilo de la que nos ha dejado gustar muchas veces el Dr. Zapata, a través de sus innumerables escritos.

"INGENIERIA QUIMICA" al publicar este interesante trabajo, quiere hacer un justo homenaje de reconocimiento al Dr. Zapata, antiguo alumno y profesor de nuestra Escuela, hace realidad el deseo de las Directivas de la Institución de dar a la publicidad la Tesis de Grado y ofrece a sus lectores la oportunidad de adentrarse en la ciencia de los cuantos.

Nota de la Redacción.

PROLOGO

La notable actividad científica de fines del siglo diez y nueve, cristalizó en dos teorías que gobiernan hoy, y regirán por mucho tiempo, las investigaciones en los campos de la física corpuscular y la cosmología. No hay qué extrañarse. Cuantos y Relatividad no son adquisiciones de validez temporal en el campo científico, sino más bien nociones fundamentales, de entera validez universal, que han entrado a formar parte del substrato inmodificable de nuestros conocimientos, y cuyo concurso, cualquiera que sea el futuro desarrollo de la ciencia, habrá de juzgarse siempre trascendental.

En la historia científica se dan también "momentos estelares". Yo diría que uno de ellos fue la aparición de la obra *Revolutionibus orbium coelestium*, "que llevará el nombre de Copérnico hasta la más lejana pos-

teridad". Pues apenas comparable a éste, es, a juicio general, la aparición de los Cuantos en Física. Pasarán muchos años antes de que la mentalidad científica universal se dé exacta cuenta de la revolución que se inició el día en que Max Planck, un sobrio profesor de física de la Universidad de Berlín, intuyó, analizando un fenómeno particular, una de las leyes más misteriosas y profundas de la naturaleza.

En esta modesta monografía se exponen las etapas más importantes que precedieron a la aparición de los Cuantos. Se trata de una recopilación enteramente bibliográfica, sin mérito especial, en la que se analizan las primeras tentativas para hallar la ley general que expresa la distribución de la energía en el espectro de un cuerpo negro; se destacan los escollos más importantes encontrados por los sabios que tomaron parte en la investigación, y se deduce la ecuación exacta que representa el fenómeno. Esta ecuación, obra del genio de Planck, lleva implícita la misteriosa noción de cuantificación, que el sabio desarrollara después aisladamente, y que sus colegas Albert Einstein y Niels Bohr aplicaron más tarde con singular éxito, para explicar el efecto fotoeléctrico, las líneas espectrales, los calores específicos de los cuerpos, etc., aplicaciones primeras que se exponen en el capítulo último de esta monografía.

Es preciso destacar que lo expuesto en estas notas es lo más elemental e inmediato de la teoría. Aquí sólo se habla del primer paso, sin hacer mención de los modernos desarrollos que dominan hoy el ámbito atómico.

Ante mi incapacidad para aportar ideas o hacer críticas a los desarrollos aquí expuestos, he preferido ceñirme a las formas de exposición halladas en obras inglesas, alemanas y estadounidenses, pero he tratado de conservar cierto espíritu didáctico, pues es mi deseo que mis discípulos de Física en la Escuela de Ingeniería Química de la U. de A., a quienes dedico cordialmente estas notas, extraigan de ellas el mayor provecho.

Digo además que si alguna interpretación de la teoría apareciera ligeramente desviada del rigorismo matemático se debe a que el trabajo está orientado a finalidades didácticas.

Medellín, noviembre/55.

NOMENCLATURA

La lista siguiente incluye los símbolos más frecuentemente usado en el curso de esta monografía. A menudo en el texto mismo se da la definición del símbolo, pero se agrupan aquí por orden alfabético para mayor comodidad.

\AA = Unidad Angstrom = 10^{-8} cm.
 A = Constante empírica en la ley de Balmer
 a_λ = Poder absorbente de un cuerpo
 $^\circ\text{C}$ = Grado centígrado
 C_1 = Constante en la ley de Wien
 C_2 = Constante en la ley de Wien
 C_v = Capacidad calorífica a volumen constante
 C = Velocidad de la luz en el vacío
 d = Diferencial; diámetro; constante en la ecuación Rydberg
 E = Energía
 E_k = Energía cinética
 E_p = Energía potencial
 E_λ = Poder emisivo de un cuerpo negro
 e = Base de logaritmos naturales; intensidad de radiación en la ley Stefan; carga eléctrica del electrón
 e_λ = Poder emisivo de un cuerpo
 F = Función matemática
 f = Función matemática; grados de libertad
 g = Aceleración de la gravedad
 h = Constante de Planck; altura
 I = Momento de inercia
 K_λ = Intensidad de emisión
 K = Constante; constante de Boltzmann; constante de integración
 L = Longitud
 l_w = Calor latente de expansión
 l_n = Logaritmo natural
 M = Peso molecular; momento
 m = Masa de una partícula; término constante en la ecuación de Rydberg; índice de un nivel energético
 N = Número de Avogadro; modos de vibrar de una cuerda; concentración de partículas; constante en series espectrales
 n = Número entero; armónico del tono fundamental
 P = Presión
 Q = Cantidad de electricidad
 q = Energía que entra a un sistema
 R = Constante universal de los gases; constante de Rydberg
 r = Radio de curvatura
 S = Superficie; constante en series espectrales
 T = Temperatura absoluta
 t = Tiempo

U = Velocidad de propagación de una onda; velocidad de grupo
 V = Velocidad; volumen; volumen molar; voltaje
 ν = Frecuencia
 $\bar{\nu}$ = Número de onda
 X = Eje cartesiano; rayos X
 Y = Eje cartesiano
 Z = Eje cartesiano
R-J = Se refiere a la ecuación de Rayleigh-Jean
R-P = Radiador perfecto, o cuerpo negro
 \int = Signo de integración
 α = Angulo; signo de proporcionalidad; radiación
 β = Angulo; constante de Nernst; radiación
 γ = Radiación; ángulo
 Δ = Incremento de una variable
 ϵ = Cuanto de energía; energía del oscilador
 θ = Angulo
 λ = Longitud de onda
 μ = Micra 10^{-6} cms.
 π = Razón de la circunferencia al diámetro 3.1416...
 ρ = Densidad; constante de Stefan
 φ = Densidad de energía; ángulo; función matemática
 Σ = Signo de suma
 ω = Angulo sólido; velocidad angular; función trabajo en el eje fotoeléctrico; trabajo termodinámico.

NOTA DEL EDITOR:

En los siguientes términos: $a\lambda$, $E\lambda$, $e\lambda$, $K\lambda$, φ_0 , $\varphi\lambda$, la segunda letra es un simple subíndice.

CAPITULO I

INTRODUCCION

(1)—El origen de la teoría de los cuantos se encuentra en algunos trabajos experimentales sobre radiación de cavidades, efectuados casi todos entre los años de 1850 y 1900.

(2)—A primera vista la teoría es apenas una explicación correcta de la forma como se distribuye la energía emitida por un radiador perfecto (cuerpo negro), en función de la temperatura del radiador y la longitud de onda de la radiación.

(3)—Es importante destacar que el supuesto básico de la teoría introdujo un postulado enteramente nuevo en la filosofía natural; postulado cuyos alcances apenas ahora se vislumbran, y que aporta elementos de análisis insospechados en el estudio teórico y práctico de micro-sistemas.

(4)—Desde su formulación (1900) hasta nuestros días, la teoría ha sufrido modificaciones importantes. Pero la primera formulación hecha por el profesor Max Planck abrió el camino y avisó la necesidad de una ruptura definitiva entre ciertas concepciones clásicas y los modernos estudios atómicos.

(5)—En su forma clásica elemental el postulado básico de la teoría puede enunciarse así:

“La materia absorbe y emite energía radiante solamente en cantidades finitas proporcionales a la frecuencia”.

Estas “cantidades finitas” se nombran *Cuantos*.

CALOR RADIANTE

(6)—La parte del espectro localizada atrás de la zona visible, en el extremo rojo, recibe el nombre de *zona infrarroja*. Su radiación difiere de la luz visible solamente en su mayor longitud de onda y constituye el calor radiante.

(7)—Se sabe por experiencia que un cuerpo sólido empieza a emitir luz roja cuando su temperatura se aproxima a 600 °C. El brillo o intensidad de la radiación, aumenta rápidamente al aumentar la temperatura, y el color cambia de rojo-sangre-incipiente a cereza intenso; luego a matices de amarillo, para llegar a blanco incandescente a unos 1.200 °C.

(8)—Este paso de luz roja, apenas visible, a luz blanca, brillante, por sólo aumento de temperatura, indica que las radiaciones sean visibles o no, son una misma naturaleza física, y, por tanto, los métodos analíticos aplicados a la radiación visible son aplicables —mutatis mutandis— a la infrarroja.

(9)—Se ha demostrado experimentalmente que la radiación térmica (infrarroja) posee las mismas propiedades de la luz: Reflexión, refracción, interferencia, doble refracción y polarización.

(10)—Un estudio cuantitativo de la radiación emitida por un cuerpo sólido o por una cavidad, implica conocer: a) Cómo se distribuye la energía radiante entre las distintas longitudes de onda (o sea cómo cambia la intensidad de la radiación con la longitud de onda). b) Qué efecto tiene en la distribución de la energía el cambio de temperatura.

(11)—Puede decirse que toda la investigación en el campo de la radiación estuvo orientada desde sus comienzos a encontrar la forma de la función matemática que liga la energía radiante con la temperatura y la longitud de onda. A este respecto es célebre la frase del sabio Gustavo Ro-

berto Kirchoff en 1859: "Es ist eine Aufgabe von hohere Wichtigkeit diese Function zu finden". Si se nota que la función fue encontrada apenas en 1900 se aprecia mejor la visión de Kirchoff.

(12)—Antes de que el problema de la radiación ocupara con insistencia la mente de los físicos se conocían los siguientes principios empíricos generales:

a) Si un cuerpo irradia más energía de la que recibe, su temperatura disminuye. Si recibe más energía de la que irradia, su temperatura aumenta.

b) Si varios cuerpos se encierran en la misma cavidad, a temperatura constante, aislados del ambiente, la energía se distribuye igualmente entre ellos.

c) Los cuerpos que son buenos emisores de energía radiante son también buenos absorbentes.

d) Un cuerpo a cada temperatura emite radiación de la misma longitud de onda que es capaz de absorber.

(13)—Imagínese una cavidad incandescente que contiene un pedazo de vidrio, otro de plata y un ladrillo refractario recubierto de bióxido de manganeso que se comporta como un cuerpo negro (radiador perfecto). Visto el interior a través de un agujero, aparece el conjunto igualmente brillante y es imposible distinguir los cuerpos. Si se retiran del horno simultáneamente el ladrillo y la pieza de vidrio, se observará que el cuerpo negro resplandece más que el vidrio, como si emitiera mayor radiación. Lo mismo se observa al sacar la pieza de plata y el ladrillo. Se deduce que la plata y el vidrio tienen menor poder emisivo que el cuerpo negro; pero dentro del horno estas diferencias se compensan porque el vidrio es transparente y transmite las radiaciones y la plata las refleja, así que el conjunto aparece uniforme. El cuerpo negro, opaco, ni transmite ni refleja sino que absorbe y radia la misma energía, lo que se comprueba sacando el cuerpo negro solo: se verá que la brillantez del horno no cambia.

(14)—De la experiencia anterior se concluyen los siguientes hechos:

a) Una cavidad isoterma se comporta como un radiador perfecto (en cuanto a calidad e intensidad de la radiación), independiente de los cuerpos que contenga.

b) A una temperatura dada la radiación de un cuerpo negro es la máxima posible y ningún cuerpo brilla más que él por irradiación térmica.

c) En el interior de una cavidad isoterma las diferencias de radiación de los distintos cuerpos se compensan.

PRIMERAS LEYES DE LA RADIACION

(15)—Considérese una radiación de longitud de onda λ incidiendo sobre un cuerpo. La razón de la radiación absorbida a la incidente total se

llama *Poder absorbente* y se representa por $a\lambda$ para indicar que corresponde a una longitud de onda particular.

$$\text{Definición: } a\lambda = \frac{\text{radiación absorbida}}{\text{radiación incidente}}$$

Para un radiador perfecto (R-P) o cuerpo negro se establece por definición: $a\lambda = 1$. Para todos los valores de λ . Para los otros cuerpos $a\lambda < 1$ pues parte de la radiación se transmite o se refleja.

Si un cuerpo a una temperatura dada emite desde la *unidad de área*, en la unidad de tiempo, una cantidad de energía $e\lambda d\lambda$ entre los límites λ , $(\lambda + d\lambda)$, entonces el valor límite de $e\lambda$ cuando $d\lambda \rightarrow 0$ se llama *Poder emisor* y es una función de λ , T y de la naturaleza del cuerpo.

(16)—Si en un sistema isoterma dq es el calor *recibido por unidad de área*, por *unidad de tiempo*, por un cuerpo cualquiera, éste será el calor recibido por los demás cuerpos en ese sistema (12 b.). Si un cuerpo absorbe la fracción $a\lambda$ de esa energía, el resto será reflejada o transmitida. La primera ley de la Termodinámica establece entonces:

$$dq = (1-a\lambda)dq + e\lambda d\lambda \quad (1)$$

La ecuación (1) es apenas un balance de energía y expresa que la energía transmitida o reflejada $(1-a\lambda) dq$, más la energía emitida $e\lambda d\lambda$, suman la energía recibida.

Llamando $E\lambda$ el poder emisor de un R-P y recordando que para el R-P $a\lambda = 1$ se deduce: $E\lambda d\lambda = dq$. Que reemplazando en la (1) se tiene:

$$E\lambda d\lambda = (1-a\lambda)d\lambda \cdot E\lambda + e\lambda d\lambda \quad \therefore E\lambda = (1-a\lambda)E\lambda + e\lambda \quad \therefore$$

$$E\lambda a\lambda = e\lambda \quad \therefore E\lambda = \frac{e\lambda}{a\lambda} \quad (2)$$

La (2) es la ecuación de Kirchoff y define el poder emisor de un R-P. Quiere decir que a λ y T constantes la relación del poder emisor al poder absorbente es igual para todos los cuerpos, e igual también al poder emisor del R-P que opera para los mismos valores de λ y T.

(17)—El poder emisor de un R-P (o intensidad específica, como también se nombra), $E\lambda$, es una propiedad importante. De la relación (2) $e\lambda = E\lambda a\lambda$ se deduce esto: si se considera un cuerpo sumergido en un ámbito isoterma, la energía emitida por el cuerpo es función de $a\lambda$ para λ -y- T constantes. Si para ese cuerpo $a\lambda = 1$ se deduce $E\lambda = e\lambda$, como esto se cumple solamente para un R-P, se concluye la importancia que tiene conocer $E\lambda$

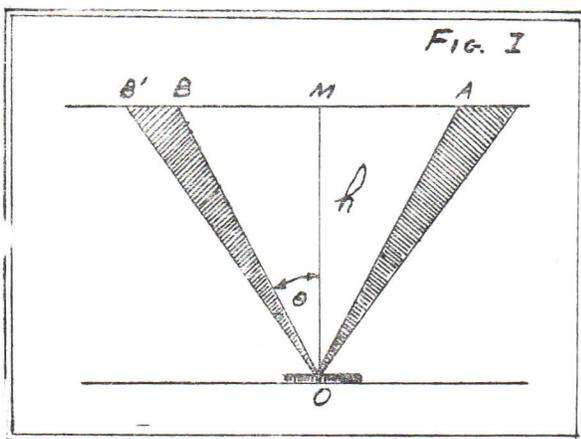
pues siendo ella dependiente sólo de λ -T- se puede escribir la función $E\lambda = \Phi(\lambda, T)$ y es esta la función buscada en la distribución espectral.

(18)—Concepto de *Intensidad de Emisión*. Considérese un pequeño elemento de área dS de un cuerpo radiante. La energía de longitudes de onda entre $\lambda - (\lambda + d\lambda)$ emitida por unidad de tiempo desde dS en el interior de un ángulo sólido $d\omega$ (véase suplemento matemático A), en ángulo recto a dS , es proporcional a: $dS, d\omega, d\lambda$. Así:

$$\text{Energía:} = K\lambda dS d\omega d\lambda \quad (3)$$

En la definición (3), $K\lambda$ es una constante para un valor dado de λ , y depende de la naturaleza del cuerpo y de la temperatura, y se llama *Intensidad de Emisión*.

(19)—La energía emitida por segundo desde el elemento dS , en un ángulo sólido $d\omega$ cuyo eje hace un ángulo θ con la normal (Véase la figura 1), es proporcional al coseno del ángulo según la ley de Lambert.



OM = Normal

θ = ángulo de $d\omega$ con la normal

O = dS

$$\text{Energía} = K\lambda \cos\theta dS d\lambda d\omega$$

$$\text{Pero, } d\omega = 2\pi \sin\theta d\theta$$

$$\text{Energía} = 2\pi \cos\theta \sin\theta dS d\lambda d\theta \quad (4)$$

Si se integra la ecuación (4) para un hemisferio, θ toma los límites 0 y $\pi/2$. Entonces:

$$\text{Energía} = \pi K\lambda dS d\lambda \int_0^{\pi/2} 2 \sin\theta \cos\theta d\theta.$$

$$\text{Energía} = \pi K\lambda dS d\lambda \int_0^{\pi/2} \sin 2\theta = \pi K\lambda dS d\lambda \left[-\frac{\cos 2\theta}{2} \right]_0^{\pi/2}$$

Energía = $\pi K\lambda dS d\lambda$. Pero esta energía es la emitida por unidad

de tiempo según (18) o sea el flujo energético y éste es igual a: $e\lambda d\lambda dS \dots$
según (15) entonces:

$$e\lambda d\lambda dS = \pi K\lambda dS d\lambda \quad \therefore$$

$$e\lambda = \pi K\lambda \quad (5)$$

(20)—La ecuación (5) liga el poder emisor $e\lambda$, al brillo o intensidad de emisión $K\lambda$. Es válida igualmente para flujo térmico y flujo lumínico.

(21)—Concepto de *Densidad de Energía*. La energía por unidad de volumen se llama “densidad de energía” y es otra definición útil en la teoría de radiación. Obsérvese la figura 1. En O se supone ubicado el elemento de área dS desde el cual irradia la energía. De la figura se obtiene:

$$\cos \theta = \frac{h}{OA} \quad \therefore \quad OA = \frac{h}{\cos \theta} \quad \text{y puesto que se trata}$$

de una radiación cuya velocidad es la de la luz C , entonces el tiempo para que la radiación llegue al plano AA es: $\frac{h}{C \cdot \cos \theta}$ segundos.

Ahora bien, la energía radiada por segundo se encontró como: $2\pi K\lambda \cos \theta \sin \theta dS d\lambda d\theta$ según la ecuación (4). Luego la energía total es:

$$\text{Energía} = \frac{2\pi h}{C} \sin \theta dS d\lambda d\theta$$

La expresión anterior da la energía radiada desde el elemento de superficie sobre el hemisferio. Pero si la superficie considerada está en equilibrio estadístico, o sea que la energía emitida es igual a la absorbida, se deduce que la energía total es dos veces la encontrada:

$$\text{Energía Total} = \frac{4\pi K\lambda h}{C} dS d\lambda \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta$$

$$\text{Energía Total} = \frac{4\pi K\lambda}{C} h dS d\lambda \quad (6)$$

Si la “Energía por unidad de volumen” es, como parece obvio, función de λ , se puede introducir la nueva definición como:

$$\frac{\text{Energía}}{\text{c. c.}} = \varphi\lambda d\lambda = \text{densidad de energía} \quad (7)$$

Si el volumen considerado es un hemisferio de radio pequeño, entonces el producto $h \, dS$, será el volumen:

$$\text{Energía total} = \varphi \lambda \, d\lambda \cdot h \, dS \quad (8)$$

Igualando las ecuaciones (6) (8) se tiene:

$$\varphi \lambda \, h \, d\lambda \, dS = \frac{4 \pi K \lambda}{C} h \, d\lambda \, dS \quad \therefore$$

$$\varphi \lambda = \frac{4 \pi K \lambda}{C} \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (5) en la (9) se obtiene:

$$\varphi \lambda = \frac{4 e \lambda}{C} \quad (10)$$

(22)—La ecuación (10) se llama “relación de Wien”, por haber sido el físico alemán Guillermo Wien quien la dedujo por primera vez y la usó para su ley de radiación que se discutirá más adelante. Ella define la “densidad de radiación” en términos del “poder emisor” y la velocidad de la luz (C).

(23)—Todo los análisis matemáticos expuestos en los numerales (15) a (22) fijan definiciones que pueden sintetizarse en la expresión siguiente:

La energía total, de todas las longitudes de onda, emitida por el radiador, por segundo, por centímetro cuadrado es:

$$E = \int_0^{\infty} e \lambda \, d\lambda = \pi \int_0^{\infty} \frac{K \lambda}{C} \, d\lambda = \frac{C}{4} \int_0^{\infty} \varphi \lambda \, d\lambda = \frac{\varphi C}{4} \quad (11)$$

$$\varphi = \int_0^{\infty} \frac{\varphi \lambda}{C} \, d\lambda \quad (12)$$

Nótese que la expresión (11) sintetiza cuanto se ha definido hasta ahora. Pero ella, en sí misma, deja insoluble el problema básico de hallar la forma matemática de $E = \Phi(\lambda, T)$.

SOLUCIONES EMPIRICAS APROXIMADAS

(24)—En 1879 Josef Stefan demostró que todos los resultados publicados hasta la fecha respecto al problema de la radiación concordaban con la siguiente ley:

“La intensidad de radiación emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del radiador”.

$$e = \rho T^4 \quad (13)$$

En la ecuación (13) ρ es una constante que depende solamente de la naturaleza del cuerpo. Si el cuerpo es un R-P, entonces ($e = E$ y ρ se llama “constante Stefan”). Es claro que si el cuerpo está en un ámbito de temperatura $T_0 < T$, entonces la energía neta irradiada será: $\rho (T^4 - T_0^4)$. Obsérvese que la ecuación Stefan es el primer acercamiento a la función buscada pues relaciona la “intensidad de radiación” con una magnitud enteramente medible como es la temperatura.

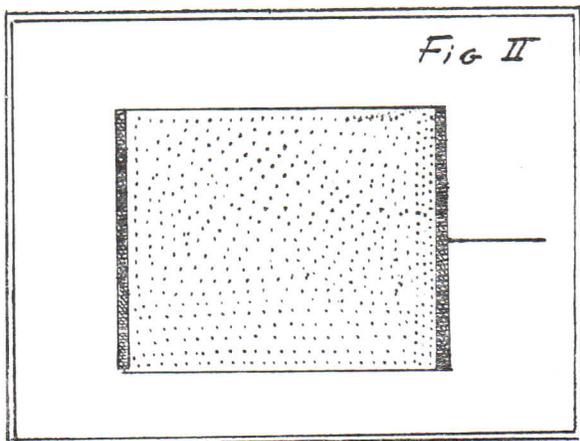
(25)—La ley de Stefan ha sido comprobada entre límites tan amplios como 100° y 2000° centígrados. Esta comprobación consiste en recibir sobre un cuerpo negro la energía irradiada por otro R-P. El receptor puede estar constituido por un cono de unos 30° de abertura cuya superficie interna ennegrecida absorbe las radiaciones que llegan en la dirección del eje del cono. Experiencias de este tipo han dado valores para $\rho = 5.72 \times 10^{-5}$. Lo cual significa que 1 centímetro cuadrado irradia por grado, 5.72×10^{-5} ergios por segundo.

(26)—Concepto de *Presión de Radiación*: J. Clerk Maxwell demostró, como una consecuencia de su “Teoría Electromagnética de la luz”, que la luz o cualquiera otra radiación al incidir sobre una superficie ejerce una pequeña presión sobre ella. (La radiación del sol ejerce $\frac{1}{2}$ miligramo por metro cuadrado de sup./terrestre. Si la radiación es perfectamente difusa la presión de radiación en dinas por cm^2 es:

$$P = \frac{\varphi}{3} \quad (14)$$

Donde φ es “densidad de energía”, expresada en ergios por cm^3 . (Véase suplemento matemático. Parte B).

(27)—Ludwig Boltzmann, austríaco, conterráneo de Stefan, halló un método para deducir analíticamente la ecuación de Stefan, suministrando así bases termodinámicas a esta primera aproximación. De ahí que la ley se llame Stefan-Boltzmann. He aquí el método:



Imagínese un cilindro vacío con superficies internas perfectamente reflectoras (Fig. 2) y provisto de un émbolo de cara interna reflectora también. Considérese que la base A, del cilindro, está formada por un cuerpo negro a la temperatura T. El R-P está en equilibrio con la radiación de densidad φ en el volumen V del cilindro y sobre el émbolo

se ejercerá una presión $P = \frac{\varphi}{3}$, según la ecuación (14). Si el émbolo se

desplaza hacia afuera un dV , el trabajo hecho es (PdV) y para conservar el equilibrio debe entrar más radiación al sistema para llenar el volumen dV , a la densidad φ (recuérdese el fenómeno de vaporización reversible). El cuerpo negro pierde entonces una cantidad de calor: $dq = lv dV$; a temperatura constante lv sería igual al "calor latente de expansión de radiación en el vacío". Si $dV = 1 \text{ cm}^3$, el calor tomado de A es igual a la suma del aumento de energía en la cavidad más el trabajo de expansión: $lv = \varphi + \frac{1}{3} \varphi$. Empleando la ecuación de Clapeyron (Véase suplemento ma-

temático C) se tiene, $lv = T \left[\frac{dP}{dT} \right]_V \therefore$

$$\frac{4}{3} \varphi = T \left[\frac{d(\varphi/3)}{dT} \right]_V \therefore \frac{4}{3} \varphi = \frac{T}{3} \left[\frac{d\varphi}{dT} \right]_V \therefore \frac{4 dT}{T} = \frac{d\varphi}{\varphi} \therefore$$

Integrando:

$$\varphi = K T^4 \dots \dots (K = \text{const. de integración}).$$

Si la energía emitida por el R-P se da por segundo, por cm^2 , entonces

$E = \frac{\varphi C}{4}$ según la ecuación (11) entonces:

$$E = \frac{CKT^4}{4} \quad \text{Al coeficiente } \frac{CK}{4} \text{ se nombra } \rho, \text{ la constante Ste-}$$

fan, luego $E = \rho T^4$, la ecuación buscada.

(28)—A los trabajos de Stefan y Boltzmann siguieron otros no menos importantes del físico alemán Guillermo Wien (1893).

En el numeral (7) se afirmó que cuando se aumenta la temperatura de un cuerpo sólido el calor de la radiación emitida cambia desde un rojo-sangre incipiente a blanco brillante (Pasando por matices intermedios). Fue comprobado experimentalmente por Lummer y Pringsheim que a cada temperatura corresponde una radiación máxima; y al distribuir en un gráfico la “intensidad de radiación” -VS- “longitudes de onda” (véase la figura 3) se encuentran *curvas en forma de campana*; todas con un punto de máxima, λ_m , característico de cada temperatura. El análisis termo-espectral de la radiación de un cuerpo negro, pudo entonces reducirse a un gráfico de curvas isotérmicas. Observando los puntos de máxima para un grupo de curvas se notó que ellos se desplazan desde el rojo al violeta en el espectro.

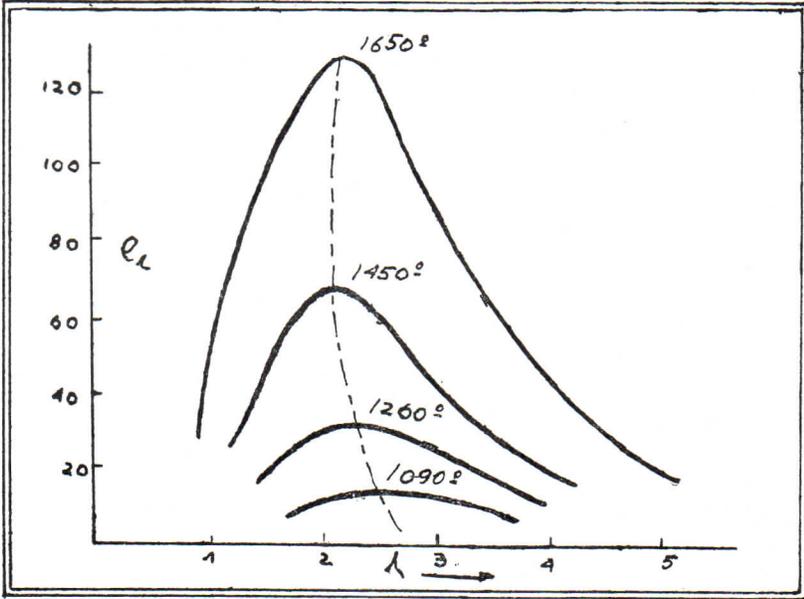


Fig. III

El lugar geométrico (locus) de los puntos de máxima, está representado en la figura por la curva punteada. Al colocar λ_m -Vs-T se encuentra que tal curva semeja mucho una parábola: luego es fácil concluir que:

$$\lambda_m T = \text{constante} \quad (15)$$



(29)—La ecuación (15) se conoce como “Ley del Desplazamiento” o ley de Wien simplemente. Obsérvese que tal ecuación liga ya las dos variables de la función básica y por tanto urgía darle un fundamento analítico, vale decir, una explicación física: cinética o termodinámica.

Wien logró deducir teóricamente su ecuación y más tarde se hallaron nuevos métodos para deducirla. Uno de ellos es así:

Considérese una cantidad definida de radiación en una caja rectangular de paredes reflectoras y de lados X, Y, Z, que se pueden expandir o contraer, de manera que la caja sea siempre semejante a sí misma. Esto puede expresarse matemáticamente diciendo que si δX , δY , δZ , son pequeños desplazamientos por segundo de los tres lados, la semejanza formal se conserva así:

$$\frac{\delta X}{X} = \frac{\delta Y}{Y} = \frac{\delta Z}{Z} \quad (\text{Simultáneamente})$$

Cualquier rayo reflejado desde una cara móvil perpendicular al eje X, debe recorrer (l) hasta la cara opuesta y volver a recorrerlo de regreso hasta la próxima reflexión (véase la figura 4). Si α es el ángulo que hace el rayo con el eje X, entonces:

$$l \cos \alpha = X \quad \therefore \quad l = \frac{X}{\cos \alpha}$$

El camino total atravesado es ($2l$) o sea:

$$2l = \frac{2X}{\cos \alpha}, \text{ despreciando}$$

el pequeño incremento δX por ser muy alta la velocidad (en verdad el segundo camino es $\frac{X + \delta X}{\cos \alpha}$).

El tiempo gastado en recorrer tal camino es:

$$\frac{2X}{C \cos \alpha} \text{ segundos, siendo } C \text{ la velocidad de la luz.}$$

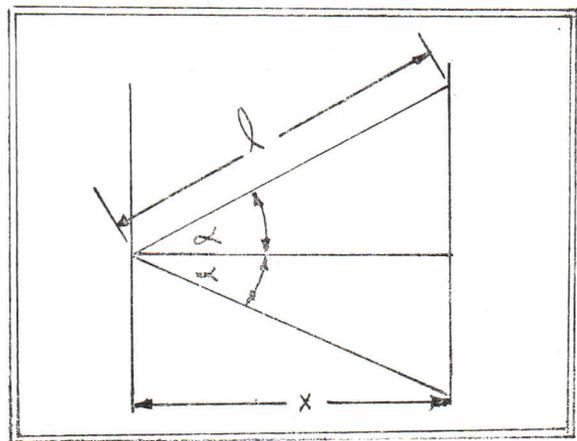
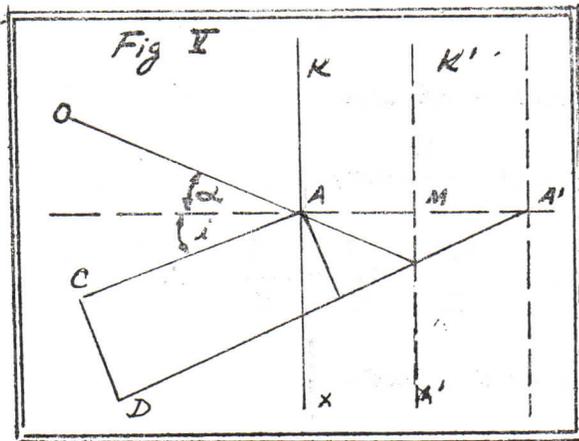


Fig. IV

Por extensión, para los rayos reflejados desde las caras perpendiculares a los ejes Y, Z, los tiempos son: $\frac{2Y}{C \cos \beta}$; $\frac{2Z}{C \cos \gamma}$. Siendo $\beta - \gamma$ los ángulos formados por los rayos y los ejes. El número de reflexiones por segundo, o sea las frecuencias de choques son:

$$\frac{C \cos \alpha}{2X}; \quad \frac{C \cos \beta}{2Y}; \quad \frac{C \cos \gamma}{2Z}$$

Considérese ahora un rayo (O A) de longitud de onda λ (Véase la figura V) que incide en A haciendo un ángulo α con la cara (K X), per-



pendicular al eje X; y supóngase que dicha cara se mueve con la velocidad constante U de izquierda a derecha. Cuando la cresta del rayo reflejado llega a C ($AC = \lambda$), la próxima cresta estará en A pero ésta debe recorrer el camino A B para alcanzar la superficie (K' X') y reflejar a lo largo de B D. La distancia entre la primera y la segunda cresta aumentó de A C a (A B + B D) y el

aumento en longitud de onda es: ($\delta\lambda x = AB + BN$) siendo (AN) perpendicular a (BD); si A' es imagen de A, esto es si el triángulo A B A' es isósceles, se tiene: $\delta\lambda x = AB + BN = AA' \cos \alpha = 2 AM \cos \alpha$

El tiempo gastado por el rayo para recorrer $AC = \lambda$ es igual al gastado por la superficie reflectora para recorrer A B, (que se puede considerar pequeño comparado con (A C) es despreciable, entonces:

$$\frac{AM}{U} = \frac{\lambda}{C} \quad \therefore \quad AM = \frac{U \lambda}{C} \quad \therefore \quad \delta\lambda x = \frac{2 \lambda U \cos \alpha}{C}$$

Este cambio de longitud de onda ocurre en cada reflexión, luego el cambio total de longitud de onda por segundo será el producto del número de reflexiones por segundo, por dicho cambio.

$$\delta \lambda_x = \frac{2 \lambda U \cos \alpha}{C} \cdot \frac{C \cos \alpha}{2 X} = \frac{\lambda U \cos^2 \alpha}{X}$$

Siendo $U = \delta X$ (o sea que la velocidad del plano es = desplazamiento del eje por segundo) se tiene:

$$\delta \lambda_x = \lambda \cos^2 \alpha \left(\frac{\delta X}{X} \right)$$

$$\delta \lambda_y = \lambda \cos^2 \beta \left(\frac{\delta Y}{Y} \right)$$

$$\delta \lambda_z = \lambda \cos^2 \gamma \left(\frac{\delta Z}{Z} \right)$$

Por semejanza.

El cambio total de la longitud de onda será:

$$\delta \lambda = \lambda \left[\frac{\delta X}{X} \cos^2 \alpha + \frac{\delta Y}{Y} \cos^2 \beta + \frac{\delta Z}{Z} \cos^2 \gamma \right]$$

Pero se estableció antes que: $\frac{\delta X}{X} = \frac{\delta Y}{Y} = \frac{\delta Z}{Z} \quad \therefore$

$$\delta \lambda = \lambda \frac{\delta X}{X} \left[\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \right]$$

Por Geometría Analítica: $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$

$$\delta \lambda = \lambda \frac{\delta X}{X} \quad (16)$$

Siendo el volumen de la caja: $X Y Z = V$

$$YZ \delta X + ZX \delta Y + XY \delta Z \quad \text{Dividiendo por}$$

$$V, \frac{\delta V}{V} = \frac{\delta X}{X} + \frac{\delta Y}{Y} + \frac{\delta Z}{Z} = 3 \frac{\delta X}{X} \quad \therefore \quad \frac{\delta X}{X} = \frac{1}{3} \frac{\delta V}{V}$$

Pero según la (16) $\frac{\delta X}{X} = \frac{\delta \lambda}{\lambda} \quad \therefore \quad \frac{\delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{3} \frac{\delta V}{V} \quad \therefore \quad \text{Integrando}$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

Puesto que $\left[\frac{V}{V_0} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{r}{r_0}$ donde r es la longitud de un lado de la caja, se deduce que cuando la caja se expande sin alterar su forma, la relación de las longitudes de onda es igual a la razón de las *dimensiones lineales* de la caja:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{r}{r_0} \quad (18)$$

Si la radiación contenida en la caja reflectora se expande o comprime adiabáticamente, la radiación total se conserva y por la 1ª Ley de la Termodinámica:

$$\omega = -dE \begin{cases} \omega = \text{Trabajo} \\ E = \text{Energía Interna} \end{cases}$$

la Energía total en la caja $V\varphi$, siendo φ la densidad de energía. Por tanto: $PdV = -d(\varphi V) = -dE$. Pero $P = \frac{1}{3}\varphi$

$$\therefore \frac{1}{3}\varphi dV = -Vd\varphi - \varphi dV \therefore \frac{4}{3}\varphi dV + Vd\varphi = 0$$

Dividiendo por $V\varphi$, se tiene: $\frac{4}{3} \frac{dV}{V} = -\frac{d\varphi}{\varphi}$

Integrando: $\frac{4}{3} \ln \frac{V_0}{V} = \ln \frac{\varphi}{\varphi_0} \therefore \left[\frac{V}{V_0} \right]^{\frac{4}{3}} = \frac{\varphi}{\varphi_0}$ Por la ecuación (17) se tiene:

$$\left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^4 = \left[\frac{V_0}{V} \right]^{\frac{4}{3}} \therefore \frac{\varphi}{\varphi_0} = \left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^4$$

Por la ecuación de Stefan-Boltzmann se vio que: $\left[\frac{T}{T_0} \right]^4 = \left[\frac{\varphi}{\varphi_0} \right]^4$

$$\therefore \frac{T}{T_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \therefore \lambda T = \text{constante} \quad (20)$$

La ecuación (20) es la ley de Wien y a ella pudo llegarse, como queda expuesto, por un camino termodinámico. El hecho de servir la ley de Stefan para la deducción de la de Wien, revela que ambas ecuaciones son complementarias y explican, a su modo, el mismo fenómeno.

(30)—*Consecuencias de la ley de Wien*: De las ecuaciones (5) y (10) se tiene:

$$E\lambda = \pi K\lambda; \quad \varphi\lambda = \frac{4\pi K\lambda}{C} \therefore \frac{E\lambda}{\varphi\lambda} = \frac{C}{4} \therefore E\lambda d\lambda \propto \varphi\lambda$$

$$\text{Luego: } \frac{E\lambda d\lambda}{E\lambda_0 d\lambda_0} = \frac{\varphi\lambda}{\varphi\lambda_0} \quad (21)$$

$$\text{Además por la ecuación (18) } \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{r}{r_0}, \text{ se tiene: } \lambda = \left[\frac{r}{r_0} \right] \lambda_0$$

$$\text{y para incrementos correspondientes: } \lambda + d\lambda = \left[\frac{r}{r_0} \right] (\lambda_0 + d\lambda_0)$$

$$\therefore \left[\frac{r}{r_0} \right] \lambda_0 + d\lambda = \left[\frac{r}{r_0} \right] \lambda_0 + \left[\frac{r}{r_0} \right] d\lambda_0 \therefore d\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot d\lambda_0 \quad (22)$$

Reemplazando la (22) en (21):

$$\frac{E\lambda \cdot \lambda}{E\lambda_0 \cdot \lambda_0} = \frac{\varphi\lambda}{\varphi\lambda_0} \quad \text{Y por la ley Boltzmann:}$$

$$\frac{\varphi\lambda/\varphi\lambda_0}{E\lambda \cdot \lambda^5} = \frac{\left[\frac{\lambda}{\lambda_0} \right]^4}{\left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^4} \therefore \frac{E\lambda \cdot \lambda}{E\lambda \cdot \lambda_0} = \left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^4 \therefore E\lambda \cdot \lambda^5 = \text{constante} \quad (23)$$

Si $\lambda T = \text{constante}$, y $E\lambda \cdot \lambda^5 = \text{constante}$, se puede escribir

$$\lambda T = K_0 \therefore K_0 = f(\lambda, T); \quad E\lambda \cdot \lambda^5 = K_2 \therefore$$

$$E\lambda = K_2 \lambda^{-5} f(\lambda T) \quad (24)$$

La ecuación (24) resume todo lo que puede enseñar la Termodinámica respecto a la función buscada. Ella se presentó a los físicos como un límite que no pudo ser superado sino cuando se entró en el campo de la cinética atómica.

(31)—Si se observa cuidadosamente la Figura 3 se verá que allí está la función buscada pero en forma desarticulada. En efecto si $\lambda T = \text{constante}$ para los puntos de máxima en las campanas. Para esos mismos puntos se tiene $E\lambda \cdot \lambda^5 = \text{constante}$. Entonces para dos puntos de máxima se puede escribir:

$$\left. \begin{aligned} E_1 \lambda_1^5 &= E_2 \lambda_2^5 \\ \lambda_1 T_1 &= \lambda_2 T_2 \end{aligned} \right\} \text{ para máximos.}$$

Para puntos distintos (no máximos) es imposible *predecir* cuál será la composición espectral pues ellos no tienen correspondencia. Esto, naturalmente, conduce a la ecuación (24): $E\lambda = K_2 \cdot \lambda^{-5} f(\lambda T)$ que conserva una función a determinar en cada caso y por eso carece de validez general.

(32)—Por qué el empeño de los físicos en buscar la función exacta de $E\lambda$? Aparte de la importancia que tiene el poder predecir cuál será la composición espectral de un sistema a ciertas condiciones finales, conociendo tal composición en otras condiciones básicas; los físicos se dieron cuenta hacia 1895 de que la dificultad subyacente en el problema era de un carácter muy distinto al que ordinariamente hallaban en sus trabajos. No parecía ser solamente que una cierta función matemática se evadía de sus cálculos y previsiones, sino que tal función parecía encerrar un enigma respecto a la naturaleza de la energía. Así lo entendieron Wien, Boltzmann, Jean, Rayleigh, etc. Y por eso en este aspecto de la ciencia se abrió un compás que coincidió, precisamente, con ciertas dudas y misterios, sobre la validez de algunos principios clásicos en el análisis de micro-sistemas. No era sólo la función, sino que algo parecía estar socavando el edificio de la física.

En próximas ediciones se concluirá este interesante artículo.



Señor PROFESIONAL:

Al recibir usted un título, prometió ante Dios y la Patria "trabajar por el progreso y adelanto de la Universidad de Antioquia".

En qué forma ha cumplido usted esta promesa?