

Un área de confluencia en la física

# Polímeros

*En diferentes campos de la física existen analogías que adecuadamente usadas son una herramienta de estudio muy poderosa.*

GUSTAVO MARTINEZ\*

## I. INTRODUCCION

En nuestros días, el desarrollo científico y tecnológico ha alcanzado un ritmo espectacular. Los avances en la electrónica, comunicación, informática, computación son palpables en multitud de aspectos de nuestra vida cotidiana. Podría uno preguntarse, ¿cuál es el efecto de esta situación en la formación actual de los físicos, en su trabajo de investigación?

Una consecuencia inmediata de la sofisticación que se ha alcanzado es la sobreespecialización de la actividad científica. A primera vista esta sobreespecialización induce una disgregación en el quehacer científico, sin embargo, en los últimos años se ha venido observando una tendencia unificadora en varios campos de la física. En general, el proporcionar descripciones concisas y generales del comportamiento de la naturaleza ha sido muy atractivo para los físicos; basta ver, a lo largo de la historia de la física, los esfuerzos realizados en la mecánica clásica para llegar a las leyes de Newton, en la termodinámica a las cuatro leyes fundamentales, en el electromagnetismo a las ecuaciones de Maxwell y actualmente en la teoría de campos a una descripción unificada de las interacciones básicas de la materia<sup>1</sup>. En las páginas a seguir se mostrará cómo un pensamiento analógico, unificador, puede darse

1. Véase al respecto el artículo "Síntesis e interacciones en física" de Rodolfo Martínez, *Revista Ciencias* No. 2, Julio/Agosto 1982, pág. 8

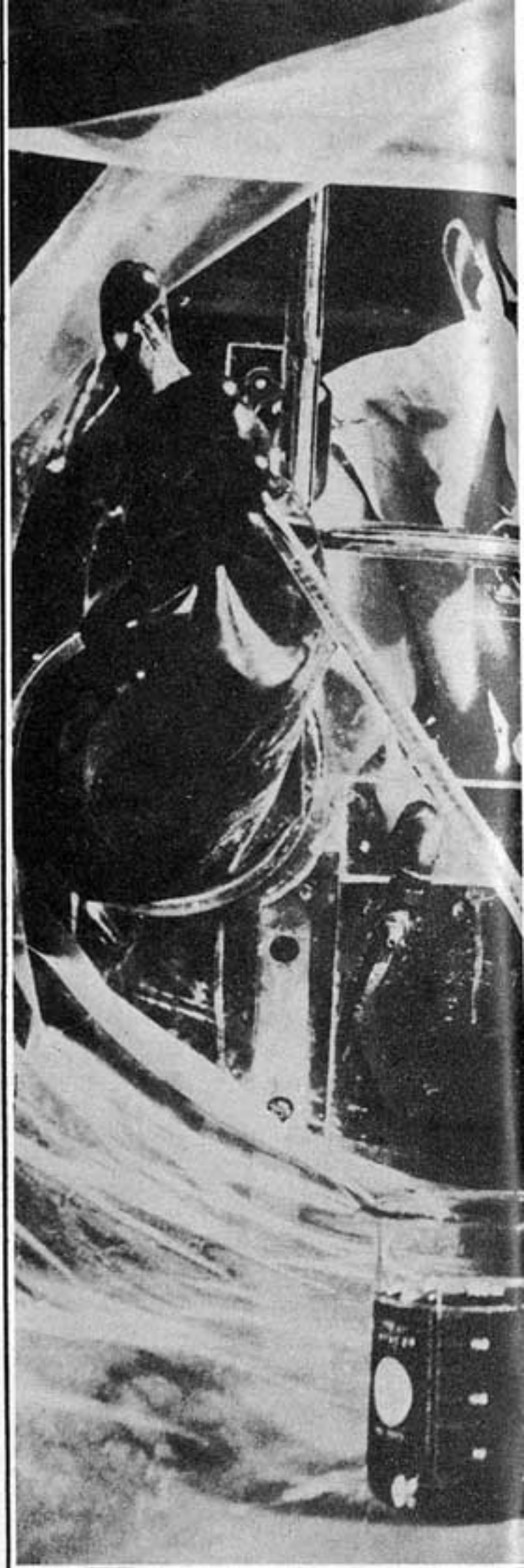
\* Investigador del Instituto de Física y profesor de la Facultad de Ciencias, UNAM.

en el contexto de la sobreespecialización arriba mencionada, proporcionando avances considerables en una variedad de disciplinas dentro de la física. El tema bajo discusión es el de la física de los polímeros, un área de la materia condensada que, como veremos, puede relacionarse con una serie de sistemas aparentemente desligados entre sí.

## II. ¿QUE ES UN POLIMERO?

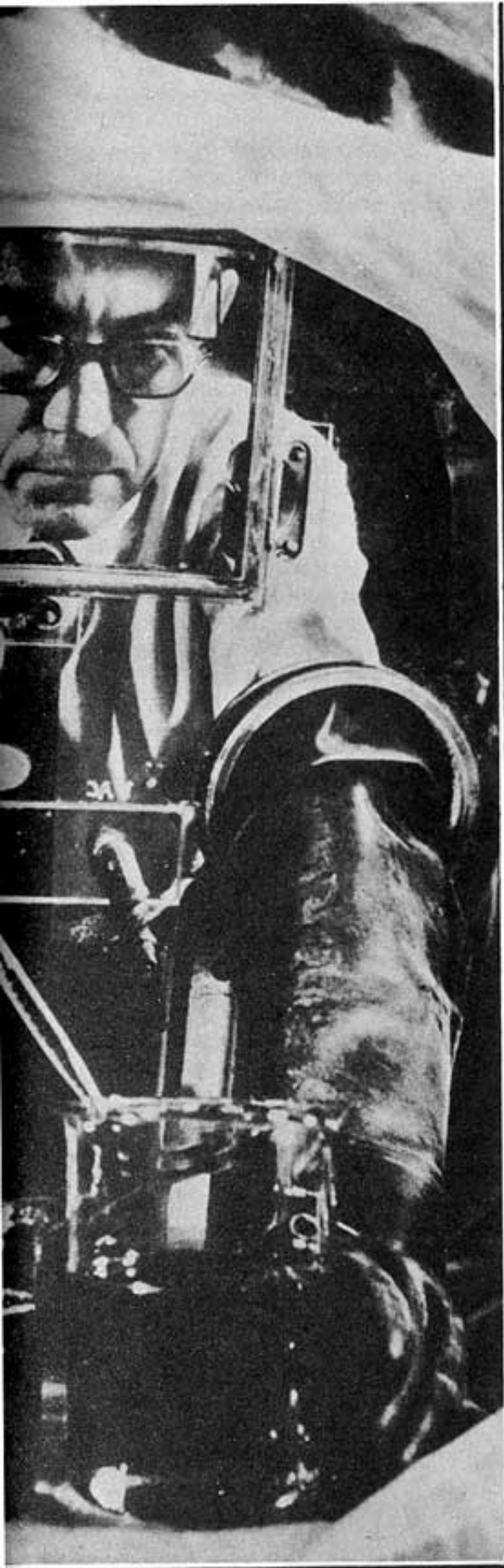
Un polímero es una macromolécula formada por la unión covalente de unidades estructurales básicas. Las unidades que se repiten se llaman monómeros y pueden ser de uno o varios (pocos) tipos (véase la figura 1). Todo monómero debe tener dos o más sitios de enlace, los cuales representan su funcionalidad; dependiendo de ésta, los monómeros que constituyen al polímero serán lineales o ramificados. Cuando la molécula polimérica tiene la estructura de una red y abarca un tamaño macroscópico considerable del material, se dice que constituye un gel. Los polímeros pueden estar formando mezclas, en solución o concentrados al 100%. Aunque la mayoría de los polímeros son orgánicos con un esqueleto basado fundamentalmente en átomos de carbono, los hay también inorgánicos basados en átomos de silicio. El peso molecular de una cadena polimérica puede ser muy variable, alcanzando valores del orden de  $10^7$  para polímeros sintéticos (poliestireno) y de  $10^9$  para biopolímeros (DNA de la *Escherichia coli*) ¿Cuál es la relevancia del estudio de los polímeros?

Para dar respuesta a la anterior pregunta basta simplemente puntualizar que:



La investigación en el área de los plásticos muestra con toda claridad la profunda interrelación que existe entre ciencia e industria.

a) Los polímeros son un componente básico de la materia viva. Si a una célula típica le quitamos el agua, aproximadamente el 90% de lo que queda son biomacromoléculas; b) Los polímeros sintéticos son de los materiales modernos de mayor impacto en la sociedad industrial



de nuestro siglo. Se estima que al principio de los años 70, en los países industrializados, alrededor del 30% de los egresados de carreras científicas que ingresaron a industrias con un componente científico, trabajaron en algún tema relacionado con polímeros.

Ejemplos de polímeros naturales son las proteínas, los polinucleótidos (DNA, RNA), polisacáridos (al-

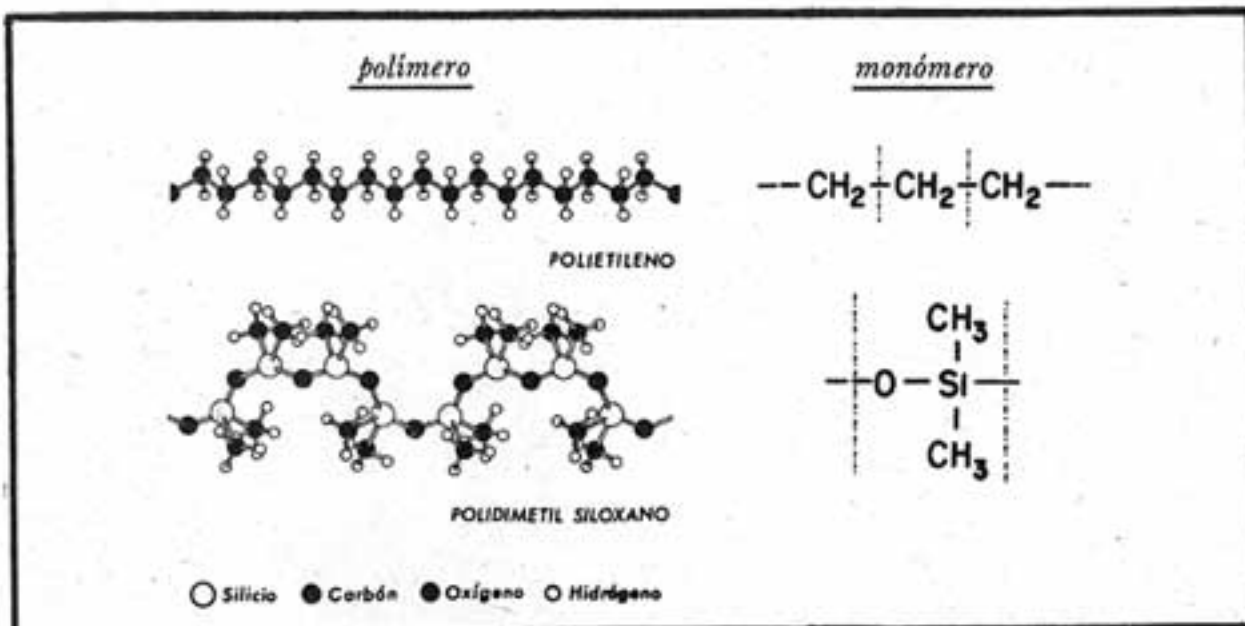


Fig. 1

midón, celulosa<sup>2</sup>), lípidos (jabones, ceras, componentes de membranas celulares, caucho, aceites naturales y resinas). Como polímeros sintéticos tenemos a: 1) los plásticos, que son materiales que al ser deformados por la aplicación de una fuerza, mantienen su nueva forma aún en ausencia de ella. Los plásticos pueden ser rígidos o flexibles, dependiendo de su resistencia a ser deformados. En algunas ocasiones forman filamentos dando lugar a las fibras sintéticas como el nylon (poliamida), orlón (poliacrilonitrilo) y dacrón (poliester). Al ser calentados, los plásticos se ablandan, cuando este proceso es reversible, se trata de termoplástico como el poliestireno, polipropileno y polivinilo; cuando no es reversible lo que sucede es que arriba de una temperatura crítica se forman enlaces cruzados entre las cadenas poliméricas con lo cual el material se endurece en forma permanente (tal es el caso de resinas como el epoxy —que son poliéteres de glicoles y dialdehídos— y las resinas fenólicas). 2) Los elastómeros, que son materiales elásticos con propiedades similares a las del caucho, por ejemplo: el poliestireno-butadieno (SBR), los silicones y los poliuretanos.

Desde el punto de vista tecnológico-industrial, la ciencia de materiales que se ocupa del estudio de los polímeros sintéticos es de una importancia crucial, pues permite la fabricación de materiales con propiedades físicas y químicas (dureza, rigidez, elasticidad, durabili-

2. El 50% del carbono orgánico de la biósfera se encuentra en la celulosa. La madera está constituida aproximadamente en un 50% por celulosa y el algodón casi en un 100%.

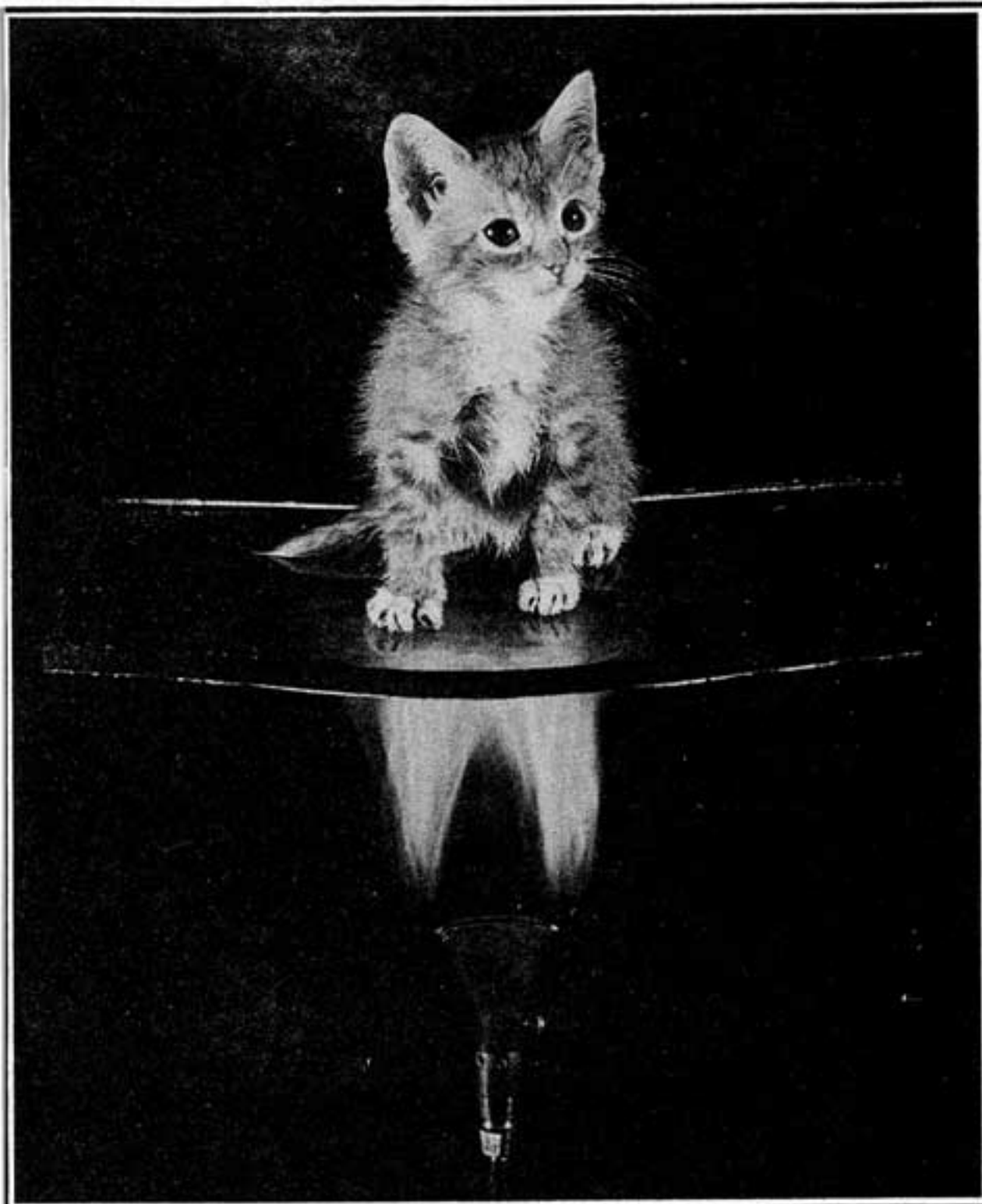
dad, propiedades ópticas, estabilidad térmica, química, etc.) específicas para un uso determinado. Ejemplos de objetos compuestos por polímeros sintéticos son los textiles sintéticos, instrumentos quirúrgicos, pinturas, adhesivos, cuerdas y mecates; esponjas, películas fotográficas, aislantes eléctricos, discos, sustancias no-adhesivas (como el teflón), llantas y juguetes.

Un aspecto de los polímeros que se sigue directamente de lo mencionado a lo largo de esta sección, es la naturaleza interdisciplinaria de su estudio. Dependiendo de que aspecto del comportamiento de los polímeros se esté estudiando, nos encontraremos en el campo de trabajo de los biólogos, bioquímicos, biofísicos, químicos, fisicoquímicos, ingenieros químicos y/o físicos. Cabe entonces hacerse la pregunta: ¿cuál es el papel de un físico que hace investigación básica en el estudio de los polímeros?

## II. LOS FISICOS Y LOS POLIMEROS

Centrémonos esencialmente en algunos aspectos teóricos del estudio de los polímeros (generalmente sintéticos) que los físicos han venido realizando a lo largo de la última década. Para ello es conveniente presentar un breve recuento histórico del desarrollo de la física y química de los polímeros, que, como veremos, es un ejemplo muy ilustrativo de la vinculación entre el desarrollo de la industria, la tecnología y la ciencia básica.

Los orígenes del estudio científico y el desarrollo industrial de los polímeros se remontan a la primera mitad del siglo XIX, con el traba-



Los plásticos han sido un material profundamente versátil. Esta lámina de características semejantes a las que se usan en las naves espaciales protege al gatito del calor de un soplete.

jo de C. Goodyear (1839) en Estados Unidos y Hancock (1843) en Inglaterra, quienes independientemente vulcanizaron el hule natural con la introducción de azufre, mejorando así sus propiedades elásticas considerablemente. Los trabajos que siguieron a este descubrimiento se centraron en mejorar algunas propiedades de los polímeros naturales. No fue sino hasta 1910 que el belga Leo Bakeland sintetizó una resina conocida hoy en día como baquelita, que abrió el camino al desarrollo de los polímeros sintéticos. En 1917, a causa de la Primera Guerra Mundial, se logró un avance considerable en la síntesis de un hule metílico a partir de dimetil-butadieno.

Un conocimiento más profundo de la estructura de los polímeros se dió en las décadas de los 30 y 40. Fue durante este período que

se afirmó la creencia, propuesta por H. Staudinger<sup>3</sup>, de que los polímeros son macromoléculas y no agregados coloidales de moléculas menores. Finalmente, durante los años 50 se sentaron las bases de la ciencia moderna de los polímeros. Algunos de los investigadores que se distinguieron a lo largo de todo este proceso fueron entre otros: Debye, Kuhn, Kramers, Mark, Carothers, Flory<sup>4</sup> y Meyer.

La relación industria-ciencia es notoria en esta época, por ejemplo, el polietileno se descubrió alrededor de 1932 por ICI. En 1934, en DuPont sintetizaron por primera vez el nylon, a finales de los 30;

3. Herman Staudinger recibió el premio nobel de química en 1953.
4. Paul Flory recibió el premio nobel de química en 1974.

en ICI obtuvieron el poli(metilmetacrilato) y tanto el poliumilo como el poliestireno se producían ya a escala comercial. De hecho, esta relación se sigue manifestando en nuestros días. Algunos avances recientes en la física de polímeros que pueden tener un enorme impacto tecnológico-industrial son: a) la síntesis de polímeros superconductores<sup>5</sup> como parte del proceso de la investigación sobre superconductores orgánicos (los laboratorios de la IBM, Bell, Xerox y Allied Chemical han estado muy involucrados en esta investigación); b) la fabricación de baterías poliméricas<sup>6</sup> (con fuertes consecuencias para la industria automotriz); c) la contribución en el entendimiento y producción de los materiales amorfos semi-conductores que se utilizan como celdas solares (en esta investigación se encuentran activos, entre otros, los complejos industriales de Exxon, Xerox, Hitsubishi, Hitachi, Sanyo y Fuji).

Volviendo a la evolución histórica de la física de los polímeros nos encontramos con un avance considerable en años recientes gracias al desarrollo de una serie de técnicas experimentales y teóricas nuevas: la difracción de neutrones, la dispersión elástica e inelástica de la luz láser, la resonancia paramagnética nuclear, métodos teóricos provenientes del estudio de problemas de muchos cuerpos y de la teoría de campos (integrales, funcionales, diagramas de Feynman, formalismos de funciones de Green), y métodos numéricos que surgieron con el desarrollo de las computadoras. De esta manera llegamos a la década de los 70 y principios de los 80, en donde el descubrimiento de la conexión entre el estudio de propiedades estadísticas de polímeros y problemas de transiciones de fase produjo un "renacimiento" en la física de los polímeros. Es sobre esta relación y algunas de sus consecuencias que se centrará el contenido de las páginas a seguir.

5. Véase: *Physics Today*, Septiembre 1979 pág. 19 y Febrero 1981 pág. 17; y el artículo de D. Bechgard y D. Jérôme, "Organic Superconductors", *Scientific American*, Julio 1982, pág. 50.
6. Véase el artículo de Francois Bénére, "La Irrupción de las Pilas de Plástico", *Mundo Científico* (versión en castellano de *La Recherche* No. 9, 1981, pág. 951).

#### IV. ESTADISTICA DE POLIMEROS Y TRANSICIONES DE FASE, UN EJEMPLO DE PENSAMIENTO ANALOGICO.

Desde que se hizo patente que un polímero es una macromolécula, la modelación de distintos sistemas poliméricos como curvas poligonales sobre redes de diversas simetrías resultó ser muy útil.

Veamos el caso más sencillo de una solución polimérica diluida. Una configuración dada, la podríamos modelar como se muestra en la figura 2, donde tenemos una red cúbica con los sitios más cercanos separados por una distancia "a" que tomamos como el tamaño promedio de un monómero. En la figura 2, la curva que representa el polímero no se corta. Sucede que

arriba de una cierta temperatura  $T_\theta$  conocida como la temperatura teta, un polímero diluido se comporta como una cuerda que no se cruza, las interacciones polímero-polímero, polímero-solvente, solvente-solvente son tales que producen un "volumen excluido" que impide que dos segmentos no contiguos se acerquen demasiado. Si pensamos que el polímero está siendo sujeto a los choques azaro-

¿La reconoce? Toda ella está rodeada de materiales plásticos

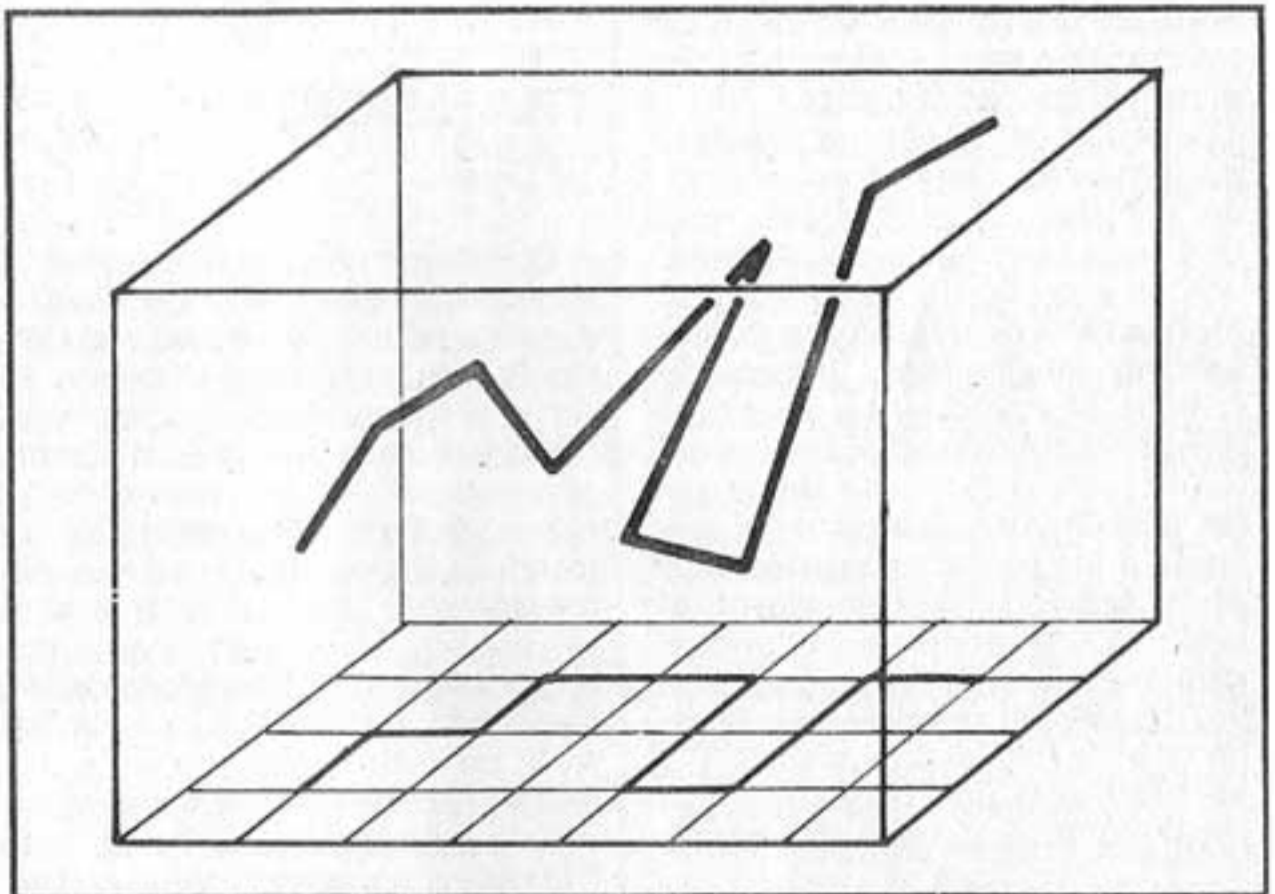


Fig. 2. Modelo en una red cúbica de un polímero en solución diluida a una temperatura  $T > T_\theta$ . La línea gruesa representa una configuración del polímero en el espacio.

sos de las moléculas de la solución, lo que tenemos es una partícula browniana con estructura interna que puede adoptar una multitud de configuraciones. Un modelo burdo del polímero es entonces una caminata aleatoria autorepelente, o sea, una caminata aleatoria que no se cruza. Podemos entonces, con este modelo calcular la distancia promedio  $R$  entre los extremos de un polímero con  $N$  subunidades, como la distancia promedio a la que llega un caminante aleatorio (por ejemplo un borracho) después de que dió  $N$  pasos, siempre y cuando nunca pise un sitio más de una vez. El resultado al que se llega es que, para  $N$  grande  $R \sim N^{\nu'}$  con  $\nu' > 1/2$  (si no impusiéramos la condición de auto-evitamiento, tendríamos el resultado  $R \sim N^{1/2}$ ). Esta analogía entre caminatas aleatorias y configuraciones poliméricas permitió el cálculo teórico de varias propiedades de los polímeros basándose esencialmente en simulaciones de las caminatas por medio de computadoras.

Propiedades como el valor de  $R$  son estadísticas (se obtiene como un promedio sobre todas las posibles configuraciones del polímero compatibles con las constricciones externas impuestas sobre el sistema) y globales (propiedades que reflejan un comportamiento colec-

tivo a escalas grandes con respecto del tamaño de la unidad del polímero). En 1972, P. G. de Gennes descubrió una relación entre propiedades estadísticas de polímeros (lineales, altamente diluidos) y transiciones de fase<sup>8</sup>. Encontró una descripción matemática para el sistema polimérico que coincidía con un caso límite de una descripción para un ferromagneto cerca de la temperatura  $T_c$  en que pierde su magnetismo. Una vez establecida la conexión, muchas analogías se hicieron explícitas: el radio de giro promedio  $s$  del polímero (que establece el tamaño promedio del polímero, es proporcional a  $R$  e indica hasta que distancia se mantiene correlacionado el polímero) corresponde a la distancia de correlación  $\xi$  del sistema magnético. Se hizo evidente que la cantidad  $|T - T_c|^{-1}$  corresponde al número de subunidades  $N$  y que por consiguiente el límite  $T - T_c \rightarrow 0$  está asociado al límite  $N \rightarrow \infty$ . De estas relaciones se sigue que el exponente  $\nu'$  arriba mencionado corresponde a  $\nu$  de la transición ferromagneto puesto que:  $\xi \sim |T - T_c|^{-\nu}$ ,  $|T - T_c|^{-1} \sim N$  y  $R \sim s \sim \xi$ , de donde  $R \sim N^{\nu'}$ , pero como  $R \sim N^{\nu'}$ , entonces  $\nu = \nu'$ .

Una vez establecido el puente

7. El símbolo  $\sim$  indica la dependencia dominante, orden de magnitud.

8. Véase el cuadro anexo para una presentación breve de algunos conceptos desarrollados en el estudio de las transiciones de fase, en particular en el contexto de la transición para-ferromagnética.

entre los dos problemas, el flujo de información entre ambos no se dejó esperar; en algunos casos, para el cálculo de cantidades específicas, pero más en general en la forma de abordar los problemas. Toda una serie de conceptos desarrollados en el tratamiento de los fenómenos críticos tales como universalidad, escalamiento, exponentes críticos, se introdujeron en el estudio de los polímeros<sup>9</sup>. El nuevo enfoque teórico aunado al desarrollo del instrumental experimental asociado a las técnicas mencionadas en la sección anterior, dieron un impulso sorprendente a la investigación experimental, la cual, a su vez ha venido reforzando y remodelando la teoría. A partir de 1972, se estableció una relación teoría-experimento muy dinámica e intensa.

Vayamos un poco más a fondo en la analogía que relaciona a los polímeros con los sistemas magnéticos. Es muy común el modelar a un ferromagneto por una red en cuyos sitios se encuentra un átomo al cual se le asocia una variable  $\vec{\sigma}$  (aquí tomaremos a  $\vec{\sigma}$  como un vector en  $R^n$ ) que llamaremos espín. Los espines pueden interactuar entre sí. Tomemos el caso en que sólo hay interacción entre espines que sean vecinos más cercanos y modelemos al sistema de tal manera que la energía de interacción de una configuración dada de espines  $\{\sigma\}$  sea  $H\{\sigma\} = -\sum_{i,j} K_{ij} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j$  (donde  $i, j$  son los sitios de la red, el producto punto es el producto escalar usual de  $R^n$ , y  $K_{ij} > 0$  es un coeficiente de acoplamiento positivo que es igual a  $K$  si  $i$  y  $j$  son vecinos cercanos e igual a cero si no lo son). Bajo estas condiciones podemos calcular el valor de expectación<sup>10</sup> (o valor promedio sobre todas las configuraciones posibles pesado por el factor de Boltzmann) del producto de espines  $\langle \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_m \rangle$  que nos mide que tan correlacionado está un espín en el sitio  $i$  con uno en el sitio  $m$  de la red. A  $\langle \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_m \rangle$  se le conoce como función de correlación espín-espín. El punto sorprendente es que si

## TRANSICIONES DE FASE

El entendimiento de lo que ocurre en una transición de fase ha experimentado un avance sorprendente a lo largo de los últimos 15 años, tanto por desarrollos teóricos (por ejemplo, K. G. Wilson recibió el premio nobel de física en 1982 por su trabajo en la teoría de las transiciones de fase) como experimentales. El objetivo de esta nota es presentar un ejemplo que permita llevar a cabo la discusión planteada en la parte central del texto de este artículo. (En un número próximo de esta revista aparecerá un artículo dedicado a la física de las transiciones de fase y fenómenos críticos).

Una transición de fase con la que estamos familiarizados es la transición líquido-vapor del agua, sin embargo, para los propósitos de este artículo, resulta más ilustrativo tratar el caso de la transición ferro-paramagnética de los imanes.

Cuando en ausencia de un campo magnético externo calentamos un imán, observamos que hay una temperatura  $T_c$  (temperatura de Curie) arriba de la cual pierde su magnetización. Al pasar por  $T_c$  el material presenta un rompimiento de simetría rotacional. A temperaturas por arriba de  $T_c$  es isotrópico mientras que a temperaturas por abajo de  $T_c$  existe una dirección privilegiada a lo largo de la cual los momentos magnéticos de los áto-

mos se orientan en promedio, produciéndose una magnetización. La magnetización es un parámetro de orden que crece de su valor cero para  $T \geq T_c$  en forma continua al ir disminuyendo la temperatura a partir de  $T = T_c$ . A este tipo de transición se le conoce como transición de fase continua (de la fase no-magnetizada a la magnetizada) y constituye un ejemplo de un fenómeno crítico.

Una característica de este fenómeno crítico es que las segundas derivadas de la energía libre del sistema, con respecto a la temperatura y con respecto a un campo externo, tienen un comportamiento singular cuando la temperatura  $T$  es igual a  $T_c$ . Este comportamiento se manifiesta en sistemas tridimensionales como una potencia negativa de  $|T - T_c|$ . Los exponentes de  $|T - T_c|^{-1}$  son algunos de los llamados exponentes críticos.

A bajas temperaturas, el imán tiene una energía de interacción entre los átomos que favorece el alineamiento de sus momentos magnéticos. Como la magnetización es el valor promedio de esos momentos, el imán se encuentra magnetizado. Al subir la temperatura, la energía térmica compite con la interacción efectiva entre los momentos magnéticos, produciéndose a altas temperaturas una orientación azarosa de los mismos y por ende una magnetización cero.

A temperaturas altas, los momentos magnéticos de los átomos

tomamos el límite de  $n \rightarrow 0$  en una forma adecuada se llega a una relación directa entre el número de caminatas aleatorias en la red entre un sitio  $i$  y otro  $m$  fijos y la función de correlación espín-espín entre los mismos puntos.

El resultado anterior nos proporciona una relación entre: la estadística de polímeros, modelos de espines en redes y caminatas aleatorias. Si nos damos cuenta de que los dos últimos casos son realizaciones específicas de problemas de campos<sup>11</sup> en redes y de proce-

dos estocásticos, que son ramas de la física de enorme aplicabilidad, vemos que la analogía establecida es muy poderosa. En términos del símil de los puertos, lo que se puede decir es que serán muy transitados. Esto es precisamente lo que ha sucedido a lo largo de últimos años, con un flujo en doble sentido.

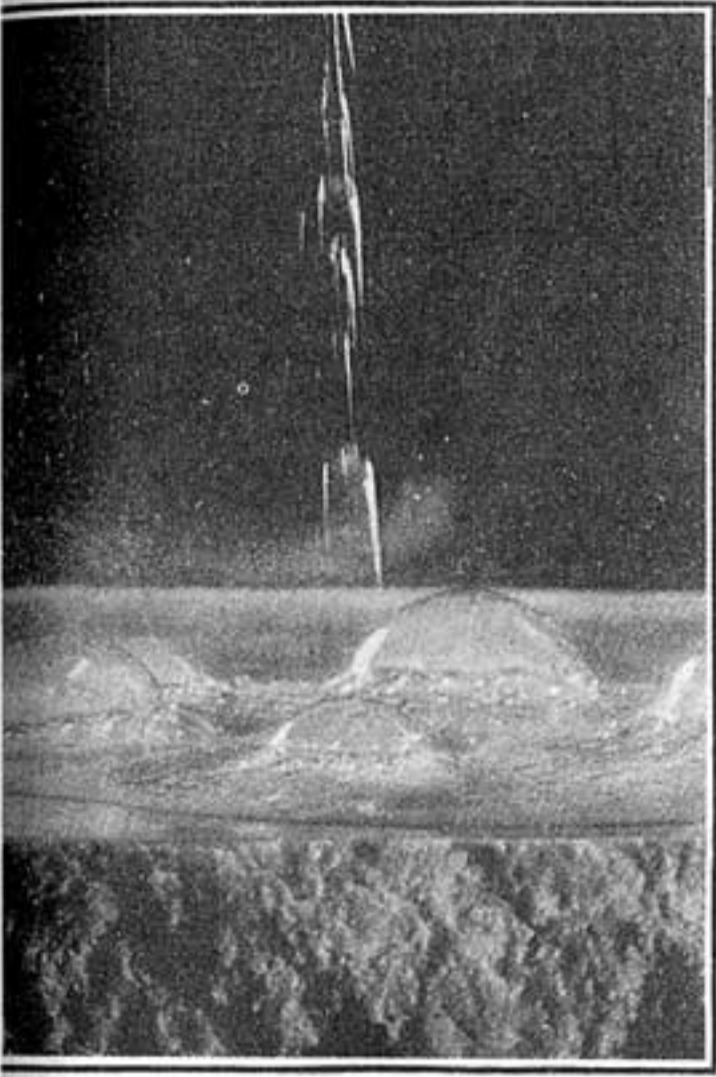
El tipo de problemas englobados con estas analogías es más extenso de lo que parece a simple vista ya que existe una conexión muy

definido sobre un espacio discreto.

9. Véase el libro "Scaling Concepts in Polymer Physics" de P. G. Gennes, Cornell University Press, Ithaca, 1979.

10. La expresión precisa de  $\langle \sigma_i \sigma_m \rangle$  es  $\sum_{\{\sigma\}} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_m e^{-\beta H\{\sigma\}}$  donde  $\beta = 1/k_B T$  con  $k_B =$  constante de Boltzmann y  $T =$  temperatura del ferromagneto. El símbolo  $\sum_{\{\sigma\}}$  indica la suma sobre todas las posibles configuraciones de espines.

11. La variable del espín es un campo



del imán tienen un comportamiento independiente, al disminuir la temperatura se forman regiones que están correlacionadas. Estas regiones tienen un tamaño lineal medio  $\xi$ . Podemos visualizar a  $\xi$  como del orden de la distancia máxima de un punto  $\bar{x}_0$  a la cual se puede detectar un cambio en el momento magnético de un átomo en la posición  $\bar{x}_0$ , de allí su nombre de distancia de correlación. A medida que nos acercamos a  $T_c$ ,  $\xi$  aumenta. En una vecindad de

$T_c$  sucede que  $\xi \sim |T - T_c|^{-\nu}$  con  $\nu > 0$ , o sea que al llegar a  $T_c$  se presentan regiones del sistema correlacionados que tienen un tamaño del orden del tamaño del sistema. En estas condiciones el sistema se encuentra fuertemente acoplado con grandes variaciones de sus momentos magnéticos respecto a su valor promedio (fluctuaciones) que se presentan a todas las escalas. Al pasar a temperaturas menores que  $T_c$  el sistema adquiere como consecuencia de un comportamiento colectivo, una magnetización.

Lo sorprendente de los fenómenos críticos es que el detalle de la interacción entre los átomos es irrelevante para el comportamiento global del sistema. Sistemas con interacciones de igual simetría, atractivos y de corto alcance que tengan la misma dimensionalidad espacial tendrán los mismos exponentes críticos y se dirá que pertenecen a una clase de universalidad. El concepto de universalidad ha sido muy explotado en el estudio de los fenómenos críticos. El entendimiento de este tipo de comportamiento adquirió una base teórica más sólida, por medio del grupo de renormalización\* que analiza en forma sistemática los cambios en el comportamiento del sistema, producidos por cambios de escala (escalamiento).

\* Véase por ejemplo el libro de G. Toulouse y P. Pfentz "Introduction to the Renormalization Group and to Critical Phenomena", 1977.

estrecha entre problemas de la materia condensada formulados vía la mecánica estadística y problemas de partículas elementales descritos en términos de teorías cuánticas de campos conocidas como euclidianas.<sup>12</sup>

El ejemplo de una cadena polimérica en solución diluida mues-

tra en la forma más sencilla las relaciones entre transiciones de fase y polímeros; durante la última década han aparecido en la literatura de investigación un sin fin de generalizaciones involucrando polímeros ramificados, en soluciones concentradas, formando fundidos, geles, prácticamente en cualquiera de sus estados. Veamos ahora, aunque sea en forma breve otro caso concreto en que se ejemplifica el tipo de relación mencionado en el párrafo anterior.

Para algunos polímeros (termoplásticos), existe una temperatura  $T_f$  arriba de la cual se funden y se comportan como un conjunto de

cuerdas entrelazadas que se deslizan unas respecto de otras (una especie de espagueti muy denso). Una propiedad que resulta ser esencial para estos sistemas es la forma en que se enrollan, o sea, las relaciones topológicas que guardan entre sí (en el límite de  $N \rightarrow \infty$  podemos hablar de los nudos que forman las cadenas). Las constricciones topológicas pueden ser introducidas en la descripción del fundido polimérico por medio de un invariante topológico conocido como el número de enrollamiento de Gauss<sup>13</sup>. Este invariante topológico es la diferencia del número de veces que una curva cerrada pasa en un sentido por la superficie compacta delimitada por otra curva cerrada, menos el número de veces que pasa en el sentido opuesto (véase la figura 3). Existe una formulación para el estudio de las propiedades configuracionales de este sistema en términos de una teoría de campo en el espacio continuo<sup>14</sup> que es idéntica a la de un superconductor (electrodinámica de cuasi-bosones), a la de modelos de espines estocásticos conocidos como vidrios de espines<sup>15</sup> a la de un tratamiento en la mecánica cuántica del efecto Bohm-Aharonov<sup>16</sup> y está relacionada con una descripción del problema del confinamiento de los "quarks"<sup>17</sup> (en este último

13. Este número está relacionado, en la teoría matemática de sistemas dinámicos con el índice de una singularidad de un campo vectorial; en la física cuántica con el comportamiento del flujo magnético en el efecto Bohm-Aharonov; en la física de superconductores y superfluidos con el número de enrollamiento en los vértices; en la biología molecular con problemas topológicos que aparecen en conexión con la conformación y replicación del DNA.
14. Un ejemplo de este tipo de teorías es el caso de los espines mencionados anteriormente definidos en todos los puntos del espacio, no sólo en las intersecciones de la red; otro ejemplo es la electrodinámica cuántica.
15. Véase el artículo de M. G. Bereton y S. Shah, "A Gauge Description of Topological Entanglements in Polymers", *J. Phys. A* 13, 1980, pág. 2751.
16. Véase el artículo de F. W. Wiegand, "Path Integrals with Topological Constraints: Aharonov Bohm Effect and Polymer Entanglements", *Physics* 109 A, pág. 609.
17. Véase el artículo de G. 't Hooft, "Topological Mechanism for Permanent Quark Confinement in a Non-Abelian Gauge Theory", *Physics Scripta*, 25, 1982, pág. 133.

12. Véase la revisión de J. B. Kogut "An Introduction to Lattice Gauge Theory and Spin Systems", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 51, No. 4, 1979 pág. 659 y el artículo de C. Rebbi "The Lattice Theory of Quark Confinement", *Scientific American*, Febrero 1983, pág. 36.

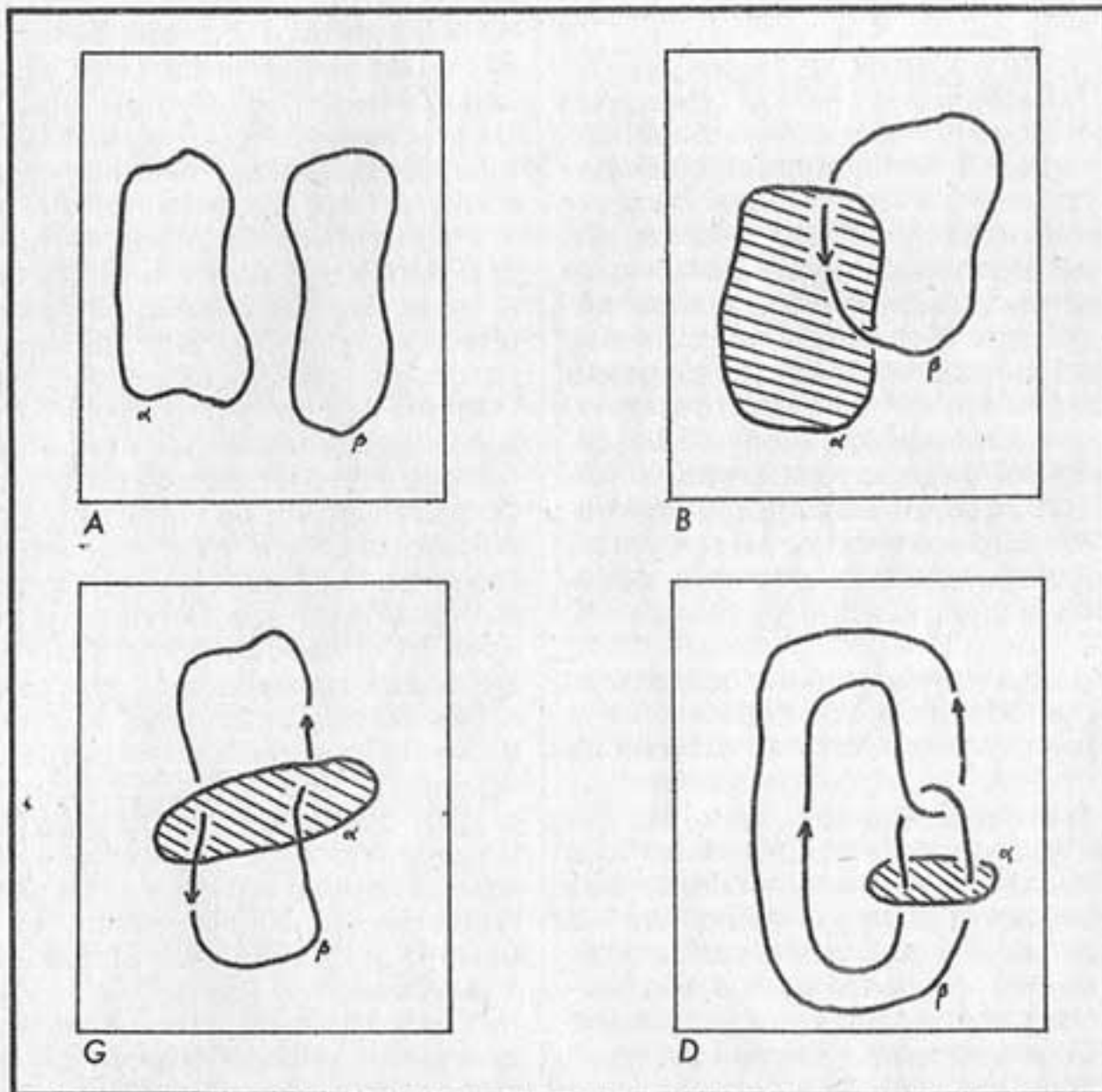


Fig. 3. La clasificación de relaciones topológicas entre los polímeros es un problema complejo. El invariante topológico  $l_{\alpha\beta}$  para los anillos polímeros  $\alpha$  y  $\beta$  proporciona un primer intento de clasificación. En el caso A) y C,  $l_{\alpha\beta} = 0$  y los polímeros  $\alpha$  y  $\beta$  están desligados. En el B,  $l_{\alpha\beta} = 1$  y están entrelazados; en el D, a pesar de que  $l_{\alpha\beta} = 0$  están entrelazados.

caso la analogía, vía superconductividad y monopolos magnéticos, lleva a la visualización de líneas de fuerza como cuerdas que corresponden a los polímeros). Es más, el conjunto de analogías no se restringe a la física. Se ha visto que para el caso de polímeros que forman anillos, la teoría de nudos desarrollada por los matemáticos es una herramienta de trabajo prometedora<sup>18</sup>.

## V. PERSPECTIVAS

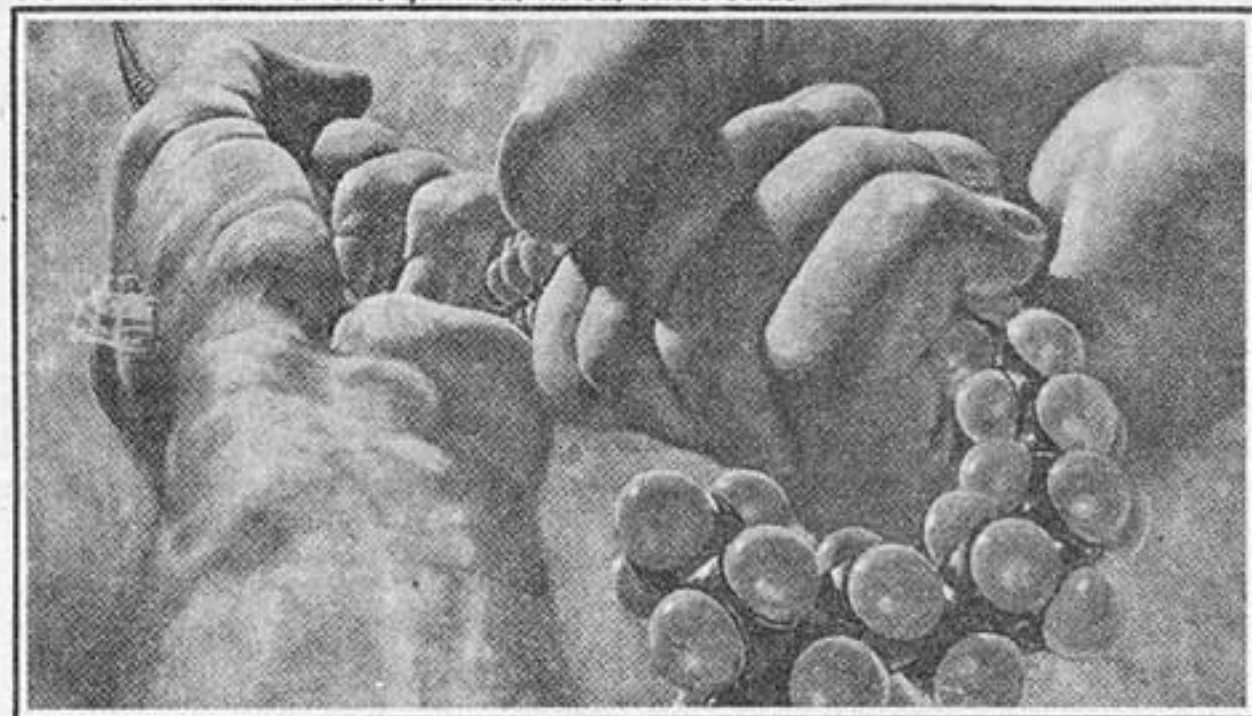
¿Cuáles son los límites del tipo de pensamiento analógico, mencionado a lo largo de la sección anterior, para el estudio de los polímeros? La experiencia de los últimos años muestra que constantemente se establecen nuevos puentes, por ejemplo el desarrollo de teorías de campo supersimétricas en el estudio de las interacciones funda-

mentales se ha reflejado en una reformulación del tratamiento de algunos problemas de la física de polímeros<sup>19</sup>. Multitud de problemas

19. Véase el artículo de G. Parisi, "Self Avoiding Walk and Supersymmetry"

J. Physique-Letters 41 1980, pág. L-403.

Una sola molécula de polietileno es una cadena de miles de moléculas básicas. En la investigación de estas y otras macromoléculas intervienen diferentes disciplinas científicas: matemáticas, química, física, entre otras.



18. Véase el artículo de R. Ball y M. Mehta, "Sequence of Invariants for Knots and Links", Physique 42, 1981, pág. 1193.

relacionados con ramificaciones de polímeros: vulcanización, mezclas, polielectrolitos, problemas de la dinámica de polímeros asociados con propiedades viscoelásticas, difusión, etc., están siendo tratados en una nueva luz. Sin embargo, la experiencia también indica que al trabajar con analogías hay que tener sumo cuidado, puesto que, a pesar de que las similitudes entre distintos problemas pueden conducir descripciones semejantes, los sistemas no son iguales. Los métodos de trabajo característicos de cada disciplina necesitan seguir desarrollándose para que el tratamiento analógico sea de utilidad. En varias ocasiones ha sucedido que la disciplina que originalmente recibió un impulso por el establecimiento de una conexión, termina eventualmente enriqueciendo a su contraparte.

## VI. DISCUSION

¿Por qué en la educación científica superior en México, en particular en la Facultad de Ciencias de la UNAM, no se fomenta una forma de pensamiento analógico? ¿Por qué en el programa de la carrera de física de la Facultad de Ciencias de la UNAM no aparecen con carácter obligatorio materias como química, fisicoquímica, mecánica estadística y física de medios continuos?

La discusión queda en manos del lector. ☺