



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

EL CONCEPTO DE SISTEMA Y EL
MOVIMIENTO DE LA MATERIA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

Q U I M I C O

P R E S E N T A :

GIL GUSTAVO MAYORGA GODINEZ

ASESORAS: M. EN C. ANA MARIA VELAZQUEZ SANCHEZ
M. EN C. GRACIELA MARTINEZ CRUZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

El concepto de sistema y el movimiento de la materia.

que presenta el pasante: Gil Gustavo Mayorga Godínez
con número de cuenta: 09754534-3 para obtener el título de :
Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán-Izcalli, Méx. a 22 de octubre de 2004

PRESIDENTE MC. Ana María Velázquez Sánchez

VOCAL MC. Guillermo Rodríguez Romero

SECRETARIO IQ. Gilberto Atilano Amaya Ventura

PRIMER-SUPLENTE Q. Antonio García Osornio

SEGUNDO SUPLENTE Dr. Ricardo Baltazar Ayala

AGRADECIMIENTOS

A TODOS AQUELLOS QUE DIRECTA O INDIRECTAMENTE
CONTRIBUYERON A LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO.

A LA MEMORIA DE VIL

ÍNDICE

	Página
Índice de figuras	1
Introducción	2
Objetivos	4
1.- Problemática del concepto de sistema.	
1.1.- El proceso científico del conocimiento	
1.1.1.- Surgimiento del conocimiento científico	5
1.1.2.- Contrastación de las teorías científicas	8
1.1.3.- Sistema concreto y sistema abstracto	10
1.1.4.- La teoría del reflejo	11
1.1.5.- El sistema y la ciencia	12
1.1.6.- Clasificación de los sistemas respecto a los campos de la ciencia	13
2.- El concepto de sistema en el estudio de la naturaleza.	
2.1.- El concepto de sistema en la termodinámica	15
2.2.- El análisis termodinámico	17
2.3.- La conservación de la energía y la primera ley	17
2.4.- El sistema termodinámico	21
3.- La organización.	
3.1.-Introducción al concepto de organización	24
3.2.- La entropía	
3.2.1.- Ley cero de la termodinámica	28
3.2.2.- Máquinas térmicas y refrigeradores	31

3.2.3.- Ciclo de Carnot	33
3.2.4.- Definición de entropía	38
4.- Las propiedades de la entropía.	
4.1.- Propiedades de la entropía	43
4.2.- Entropía y organización	52
4.3.- Movimiento cíclico y progresivo / regresivo.	58
4.4.- Irreversibilidad	
4.4.1.- La desigualdad de Clausius	66
4.4.2.- Sistemas abiertos	75
4.5.- La flecha del tiempo	78
4.6.- Niveles de organización de la materia y concepto de sistema	90
5.- Definición del sistema en función de la categoría gnoseológica de materia.	
5.1.- Concepción materialista dialéctica de la materia, el movimiento, el tiempo y el espacio	101
5.2.- El sistema como ámbito del movimiento de la materia	114
Conclusiones.	118
Bibliografía	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esfera soportada en una canastilla que pende sobre una mesa	25
Figura 2.2 Cubos apilados bajo la acción de un campo gravitacional	26
Figura 3.1 Ciclo de Carnot	34
Figura 3.2 Máquina térmica que opera entre dos fuentes de calor	35
Figura 3.3 Proceso cíclico reversible no necesariamente de Carnot	39
Figura 3.4 Reducción de un ciclo reversible a sus correspondientes ciclos de Carnot	39
Figura 3.5 Refrigerador que opera entre dos fuentes de calor	42
Figura 4.1 Modelo del gas ideal como caja con esferas	46
Figura 4.2 Distribución de partículas en dos niveles de energía	49
Figura 4.3 Sistema conformado por dos recipientes con gas	57

INTRODUCCIÓN

En el estudio de las ciencias químicas, el estudiante y el investigador se encuentran una y otra vez con la definición de sistema y la entienden comúnmente como la "parte del universo físico que se desea estudiar", constituye para ambos el objeto de estudio de su interés inmediato, susceptible de delimitación e inclusive de manipulación. Tenemos así una definición de sistema extraordinariamente general que abarca objetos tan diferentes desde una masa de gas confinada hasta una célula, desde algo tan grande como un planeta hasta algo tan pequeño como un átomo.

Los sistemas pueden ser objetos perfectamente distinguibles mediante conceptos simples, asequibles para el lenguaje común, pero también pueden ser objetos más complicados. Así, un gas en equilibrio fisicoquímico con un líquido en confinamiento, una masa de metales o minerales mezclados, etcétera; requieren conceptos nuevos, más propios del lenguaje científico, tales como coloide, conglomerado, aleación, entre muchos otros.

Esta amplitud de la definición de sistema se debe a que su acepción más usual implica un proceso de abstracción que realiza el observador al enfocar su objeto de estudio. El investigador "aisla" (separa) mentalmente y, si es posible, mediante cierta instrumentación al objeto de interés; que puede a su vez estar compuesto por otros objetos que el investigador puede aislar de la misma manera si su interés lo requiere y a la inversa, puede concebir su objeto en conjunción con más objetos, ampliando en los hechos, el tamaño de su sistema, o más bien optando por un nuevo sistema que abarca al anterior y a otros nuevos. Sin embargo, un investigador no suele "construir" sistemas meramente al azar cuando investiga un fenómeno. El éxito de su trabajo se concreta cuando logra discriminar entre distintos enfoques y elige el o los que mejor describa(n) el suceso en estudio. ¿Qué hay en la definición de sistema que permite esta

discriminación al observador? Por principio de cuentas se advierte ahora, que la arbitrariedad al seleccionar el sistema no es absoluta. La noción de sistema se concibe como dependiente del tipo y magnitud de los eventos que tienen lugar en su interior y que no son otra cosa que determinados tipos de movimiento de la materia que los constituye; movimiento entendido no sólo como movimiento mecánico sino también como reactividad química e interacciones de campos y ondas entre otras formas.

Con el presente trabajo de tesis se propone llegar a un primer acercamiento a una solución de esta problemática, mediante un proceso de aproximación teórica a la cuestión de la relación entre sistema y observador. Sugiriendo un concepto de sistema que esté en relación al proceso de movimiento de la materia y sea por tanto independiente del proceso de observación, se pretende proporcionar un concepto que sitúe al sistema como marco de referencia de uno o varios tipos de movimiento que son de interés del investigador. Para lograr lo anterior se enfocará el problema desde el punto de vista de las consecuencias fisicoquímicas de la noción de sistema, como son: grado de restricción, entropía y organización. Será indispensable también entender la relación entre la entropía y la información, la cual nos permitirá clasificar el movimiento en dos tipos generales: movimiento cíclico relativamente estable y movimiento progresivo / regresivo, el primero refiere los estados de equilibrio relativo y el segundo los cambios que redundan en un aumento o decremento de la organización de un sistema. Ambos son conceptos generales ampliamente abordados por la teoría del materialismo dialéctico, pues poseen un contenido científico real que también se propone explicitar en el trabajo por métodos igualmente teóricos, de tal manera que ambos tipos de movimiento sean el marco de referencia para conceptualizar al sistema.

OBJETIVOS

a) Objetivos generales:

- Estudiar filosófica y bibliográficamente el concepto de sistema en general, que incluya tanto a los sistemas abstractos como a los concretos, como consecuencia del movimiento y de la organización de la materia en el tiempo y el espacio para contextualizar el objeto de estudio de la ciencia.

b) Objetivos particulares:

- Determinar la diferencia entre los sistemas abstractos y los sistemas concretos desde el punto de vista lógico-metodológico.

- Establecer la función energía y la función organización como las coordenadas fundamentales en la enunciación del concepto de sistema en general.

- Presentar una clasificación de los sistemas en función del movimiento de la materia que tiene lugar en su interior.

- Mostrar las dos grandes clases de movimiento, cíclico y progresivo/regresivo para relacionarlos con el concepto de sistema.

1.-PROBLEMÁTICA DEL CONCEPTO DE SISTEMA.

1.1-El proceso científico del conocimiento.

1.1.1-Surgimiento del conocimiento científico

El ser humano posee desde su comienzo como especie las capacidades de conocimiento inherentes a su condición animal, que son el legado de sus ancestros no humanos: habilidades para buscar su alimento, agua y resguardo del clima, etc., pero además posee capacidades intelectuales que rebasan cualitativamente los procesos mentales de los demás animales: posee la aptitud de razonar, esto es, de encontrar relaciones entre los objetos, de planear sus acciones, de comunicarse con sus semejantes mediante lenguajes convencionales, etc. El conocimiento humano es esencialmente racional y no instintivo.

Es un lugar común identificar al conocimiento científico como el conocimiento humano por antonomasia, pero razonando así se pasa por alto que este es relativamente reciente y que el ser humano no comienza a conocer científicamente, es decir, que existen formas de conocimiento precientíficas.

El paso al conocimiento científico tiene lugar por medio de "escalones" históricos, los primeros de los cuales son de orden puramente fenomenal, ya que en un principio el ser humano no es capaz sino de aprehender la superficie de los procesos naturales, sólo percibe los *fenómenos*, las experiencias sensibles. Lo mismo el primitivo cazador-recolector que los ciudadanos de la antigüedad y la edad media fueron del todo incapaces de penetrar en la esencia de los procesos de la naturaleza y de su propio ser social, se limitaron a identificar a los procesos como una sucesión temporal de fenómenos, advertían que a un fenómeno determinado se sucedía otro. Pronto advirtieron que determinadas

manipulaciones y no otras producían determinados sucesos, y si estos resultaban provechosos, los repetían y sistematizaban. La fuente fundamental del conocimiento humano es a fin de cuentas el proceso de trabajo, la acción de transformación de la naturaleza en aras de la obtención de objetos útiles para la existencia de la humanidad: alimentos, agua, vestido y calzado y también las herramientas, instrumentos y materiales necesarios para la misma producción.

Mientras se desenvuelve sobre esta base, el conocimiento racional humano se desarrolla mediante procesos empírico-espontáneos, la actividad de conocer no constituye una progresión separada del proceso de trabajo y, por lo tanto, los instrumentos de trabajo constituyen al mismo tiempo los instrumentos de conocimiento.

Con la acumulación y transmisión de conocimientos empíricos, los humanos comienzan a ensayar "explicaciones" de la repetición de tales sucesos. Tales explicaciones son, naturalmente de orden fantástico y/o mítico y se limitan a reflejar en la naturaleza aquellas ideas que han formado sobre sí mismos, así surge la ideología religiosa y la ideología en general. *La acumulación de saber empírico-fenomenal no conduce mecánicamente a la creación de la ciencia*, no hay huella de un tal proceso de generalización o inductivo como fuente de las leyes científicas, pues la mera generalización nunca rebasa la esfera del fenómeno.

Con la división de la sociedad en clases sociales sobreviene la división del trabajo en intelectual y físico, el primero se adscribe a las clases dominantes y el segundo a las clases dominadas. El trabajo intelectual comprende la organización de la producción, la elaboración y difusión de la ideología, la organización del aparato estatal (condición de la dominación de unas clases sobre otras) y la producción artística.

Una vez dada la división de la sociedad en clases, la creación del conocimiento científico habría de esperar a la creación del pensamiento científico, es decir, lógico-racional, que tuvo lugar en la formulación de la filosofía clásica griega, que intenta por primera vez en la historia explicar lógicamente la esencia oculta de los procesos que transcurren bajo la apariencia fenomenal. Los griegos sistematizan por primera vez el pensamiento, elaboran la matemática, la lógica y la filosofía e intentan descubrir la lógica de la naturaleza, logro que; sin embargo, no conseguirán.

A lo largo de la Edad Media europea el avance de la tecnología, la sostenida acumulación de conocimientos empírico-espontáneos y el surgimiento de nuevas posturas metodológicas, plasmadas en el *Novum Organon* de Francis Bacon, brindaron el contexto histórico al surgimiento del método hipotético-deductivo de la ciencia y, por tanto; a la observación sistemática, la medición y la experimentación como medios de conocimiento de los fenómenos físicos, avances que se plasmaron en la obra científica y teórica de Galileo Galilei (principalmente en su *Mecánica*)¹ y posteriormente en las de Newton y Leibniz. Los descubrimientos de Galileo llevaron a flote el continente de la física, que incluye también a las ciencias químicas y biológicas. El estudio de la naturaleza física se convirtió en una ciencia².

Pero, ¿en qué consiste el paso a la ciencia? Precisamente en elaborar una explicación lógica, contrastable empíricamente, para un proceso, en sugerir la esencia del proceso y no en una simple generalización de los fenómenos. Es decir, dada una cierta clase de fenómenos, un científico *abstrae* uno o unos pocos aspectos del fenómeno y formula con ellos un objeto mental que sólo posee estos aspectos. Entonces elabora con respecto a este objeto mental una explicación lógica del *por qué* del fenómeno, es decir, una *teoría*, que es un conjunto de hipótesis que establecen la correlación de las regularidades que se presentan en

¹ E. de Gortari, *El método dialéctico*, México D. F., 1982, pág. 43.

² L. Althusser, *La revolución teórica de Marx*, 24ª ed. México D. F., 1990, pág. XI.

tales eventos, esto es, *la esencia del proceso*. Una esencia hipotética de la cual se extraen consecuencias lógicas susceptibles de contrastarse por medio de observaciones sistemáticas, mediciones y aún experimentos, es decir, por medios empíricos. Así surge una forma de conocimiento racional cualitativamente nueva.

La determinación de las leyes que rigen a estos objetos abstractos constituye la fundación de las ciencias, una ciencia es la producción de conceptos que designan, explican y determinan esos objetos abstractos que son a su vez reflejo de determinados aspectos de los objetos concretos.

1.1.2-Contrastación de las teorías científicas

La verificación o no verificación de una contrastación retro-alimenta a la teoría y enriquece el conocimiento que se obtiene de la realidad. ¿Cómo se lleva a cabo esto? Si una hipótesis fundada lógicamente para la explicación de un determinado proceso, que no es más que una conjetura plausible, busca contrastarse, han de deducirse de ella determinados efectos observables. Al realizar la contrastación pueden tener lugar diferentes situaciones. Suponiendo que las consecuencias lógicas deducidas de una hipótesis inicial "x" sean *dos*, con sus dos correspondientes pruebas empíricas. La siguiente tabla muestra los posibles resultados:

Caso	1	2	3	4
Prueba 1	√	X	√	X
Prueba 2	√	X	X	√

Donde:
 √ Prueba confirmatoria
 X Prueba desconfirmatoria

Siempre suponiendo que se puedan obtener pruebas concluyentes.

¿Qué se puede concluir de los diferentes casos?

En el caso 1, cuando ambas pruebas resultan confirmatorias, sería tentador pensar que la hipótesis es verdadera, o sea; que la esencia oculta del proceso se ha "revelado" en la hipótesis inicial. Hay algo de cierto en esto, pero no debe caerse en tal tentación, pues nada puede afirmarse en el sentido de que no puedan encontrarse nuevas hipótesis deducidas de la original que arrojen pruebas desconfirmatorias en el futuro, y por lo tanto, del caso 1 sólo puede afirmarse que dentro del ámbito estricto de las pruebas realizadas, la hipótesis no ha sido refutada, pero al mismo tiempo no puede afirmarse que no pueda ser refutada en un tiempo futuro.

En el caso 2, la hipótesis ha quedado descartada, pero, de nuevo, no en forma absoluta; nada garantiza que no pudieran deducirse nuevas pruebas para determinar si acaso no se excedieron con las anteriores el ámbito de validez de la hipótesis original.

El resultado en ambos casos es que, contra las apariencias, una hipótesis no puede ser aceptada o descartada en forma absoluta. Lo cual se haría patente con casos como los 3 y 4, que arrojan resultados aparentemente ambiguos, que indican que si bien la hipótesis original refleja o explica coherentemente alguno o algunos aspectos del proceso en estudio, no está contemplando otros de importancia.

"La base empírica de la ciencia objetiva, pues, no tiene nada de 'absoluta'; la ciencia no está cimentada sobre roca: por el contrario, podríamos decir que la atrevida estructura de sus teorías se eleva sobre un terreno pantanoso, es como un edificio levantado sobre pilotes. Estos se introducen desde arriba en la ciénaga, pero en modo alguno hasta alcanzar ningún basamento natural o 'dado'. Cuando interrumpimos nuestros intentos de introducirlos hasta un estrato más profundo, ello no se deba a que hayamos topado con terreno firme; paramos

simplemente porque nos basta que tengan firmeza suficiente para soportar la estructura, al menos por el momento.³

Todo lo anterior redundaría en la conclusión de que una hipótesis nunca se ha de descartar de manera absoluta, como tampoco se ha de aceptar de manera absoluta, pues la naturaleza misma de las pruebas como operaciones particulares descarta tal pretensión. Lo que se persigue en todo caso en una teoría es el grado mayor de confirmación empírica y la delimitación estricta del ámbito de validez de dicha teoría señalado por la evidencia desconfirmatoria. Esta necesidad impulsa el desarrollo de nuevas teorías a partir de las precedentes, en oposición a estas, o bien, la adecuación de las hipótesis de partida. Las pruebas desconfirmatorias marcan el límite de una hipótesis y por lo tanto la necesidad de una nueva hipótesis o por lo menos de una adecuación de la antecedente. Cosa que no ocurre con las pruebas confirmatorias. En otras palabras, la incompletud intrínseca de las teorías científicas espolea el avance de la ciencia.

1.1.3-Sistema concreto y sistema abstracto

El proceso de abstracción, que es la fase inicial del conocimiento científico, no es otra cosa que una delimitación, una demarcación, del proceso en estudio, el objeto mental resultante no es sino un **sistema abstracto**, que es, en primera instancia, el objeto de estudio de la ciencia. Cuando, a partir de la teoría que rige este sistema se infieren determinadas hipótesis verificables empíricamente y se particularizan mediante la sustitución de sus variables por magnitudes fácticas, se dice que el sistema se *concretiza*, el objeto-proceso, la *cosa* a la cual se refieren dichas inferencias para contrastarlas empíricamente es un **sistema concreto**; el cual siendo multifacético se hace coincidir con un determinado proceso que se desea estudiar y se hace caso omiso de otros que, sin embargo, tienen o tendrán lugar indefectiblemente y han de marcar su impronta en la contrastación. Se dice

³ Karl R. Popper, *La lógica de la investigación científica*, Madrid, España, 1980, pág. 106.

que al *concretizar*, se hace *abstracción* de la gama infinita de los procesos que tienen lugar en el sistema concreto.

La abstracción es la diferenciación del objeto-proceso *desde* la totalidad de la naturaleza. La concretización es la contextualización del objeto-proceso como *parte* de la naturaleza en el marco de la contrastación.

Queda claro que este ciclo de abstracciones-concretizaciones, que es el **método dialéctico de las ciencias**, tiene muy poco que ver con la inducción y la deducción, las cuales únicamente se mueven en la esfera fenomenal, mientras que en el proceso científico de conocimiento se trata de la relación entre la esencia y el fenómeno y no de la simple acumulación de datos empíricos. La inducción y la deducción se corresponden más con el conocimiento precientífico o empírico-fenomenal que antecede a la ciencia.

1.1.4-La teoría del reflejo.

Así, desde el punto de vista de la metodología y de la epistemología parece tener muy poco sentido hablar de un reflejo del objeto-proceso en la mente del sujeto cognoscente, es decir, de una teoría del reflejo, pues el conocimiento se trata, para estas ramas filosóficas, de adelantar explicaciones lógicas empíricamente contrastables. Pero dicha "teoría del reflejo" sí que tiene sentido para la gnoseología materialista, que no contempla la relación de los agentes del conocimiento *con el conocimiento mismo*, como sí lo hacen la metodología y la epistemología. Desde el punto de vista de la gnoseología, la naturaleza se refleja realmente en la mente del sujeto cognoscente, aunque lo haga relativa y condicionalmente, para ella, una teoría es, a fin de cuentas; conocimiento de la realidad, si se ha verificado, así sea sólo en un caso limitado. Y en ese sentido y sólo en ese sentido, dicho conocimiento es un *reflejo* de la naturaleza, un reflejo parcial, relativo, condicional, por tanto, susceptible de modificarse o aun de ser

reemplazado. Por ello, ha de tenerse cuidado al hablar de *reflejo* de en que contexto se hace.

1.1.5.-El sistema y la ciencia

En vista de todo lo anterior se colige que uno de los conceptos más generales del conocimiento científico es el concepto de sistema, el cual toma diferentes enunciados dependiendo de la rama de la ciencia de que se trate; es decir, de la escala de la observación del estudio y de las formas de movimiento inherentes al objeto que se investiga. Esto implica que el concepto de sistema es inseparable del proceso concreto de investigación de la naturaleza. El problema del concepto de sistema es el problema del objeto de conocimiento de la ciencia, entendiendo la ciencia en su sentido amplio, como el estudio parcial de la realidad a cualquier escala y en todas sus formas de movimiento, o de cambio, que manifiesta. "El concepto de sistema es el proyecto fundamental de la ciencia, sobre cuya base, y bajo el aparente caos de los fenómenos empíricos, se revelan determinadas leyes"⁴.

La investigación de esta problemática ha de resolverse desde una multitud de campos de conocimiento científico: filosófico, matemático, físico e histórico-social, pero dicha solución se encuentra condicionada por el avance de los principios, teorías y herramientas de investigación de cada campo, de ahí que sean la filosofía, la física y las matemáticas los que se encuentran quizá en la mejor posición de aportar materiales para la investigación de esta problemática, sin despreciar los aportes de otros campos científicos como la historia o la economía política, que han ayudado notablemente en la formación del concepto moderno de la materia⁵. El continente de la física en sus diferentes ramas (física, química, biología) ha avanzado notablemente en el conocimiento de la naturaleza y sus avances han provocado grandes cambios en el campo filosófico; filosofía y

⁴ K. Kosik, *Dialéctica de lo concreto*, México, D. F., 1979, pág. 110.

⁵ Es relevante que el texto que contiene la concepción teórica más avanzada de la realidad objetiva sea una obra de economía política: *El capital* de Marx.

física se han retroalimentado desde la antigüedad y el resultado ha sido que la propia física se ha impregnado de un gran contenido filosófico, por ello no es gratuito que en el estudio de esta se tenga siempre presente un concepto al menos intuitivo de sistema.

1.1.6-Clasificación de los sistemas respecto a los campos de la ciencia

Del concepto general de sistema se desprenden conceptos de sistemas particulares que corresponden a otros tantos campos de la ciencia, y que pueden clasificarse como sigue.

- Metodológicamente:

= s. abstractos o conceptuales

= s. concretos

- Por el continente científico abstracto al que están enfocados:

= s. físicos

= s. matemáticos

= s. histórico-sociales

- Dentro del continente de la física se puede hallar esta clasificación:

= s. físicos en el sentido habitual del término

= s. químicos, que involucran reacciones químicas

= s. biológicos, que abarcan los procesos de los ácidos nucleicos y de las células

- A su vez, dentro de la física en el sentido habitual se tiene

= s. macroscópicos

= s. microscópicos

- Y dentro de los macroscópicos

= s. termodinámicos

- = s. eléctricos
- = s. mecánicos

- Dentro de los sistemas termodinámicos se tiene:

- = s. aislados
- = s. cerrados
- = s. abiertos

- El continente de la matemática incluye

- = s. lógicos, entre otros.

- El continente de la historia incluye

- = s. comunistas primitivos
- = s. feudales
- = s. asiáticos
- = s. capitalistas
- = s. socialistas, entre otros.

Esta lista no es, por supuesto, exhaustiva, pues tiende a ramificarse al infinito como infinitas son las manifestaciones de la materia y asimismo, diferentes ramas tienden a unificarse, como en el caso de los sistemas cibernéticos.

2.-EL CONCEPTO DE SISTEMA EN EL ESTUDIO DE LA NATURALEZA.

2.1-El concepto de sistema en la termodinámica.

La ciencia termodinámica consiste en un sistema conceptual en cuya base se encuentran un conjunto de leyes y principios que explican y determinan un determinado conjunto de sistemas abstractos que son, a saber,

- Sistema aislado, aquel que no intercambia energía ni masa con su entorno.
- Sistema cerrado, aquel que intercambia energía pero no masa con su entorno.
- Sistema abierto, aquel que intercambia tanto energía como masa con su entorno.⁶

Esto nos indica que el sistema puede o no estar en contacto de algún modo con la materia que se encuentra en sus alrededores a través de la frontera, con su *entorno*, y esta característica es la principal del sistema. ***Juntos, sistema, frontera y entorno conforman una totalidad: el universo físico, que es el ámbito, de las ciencias particulares como la física y la fisicoquímica, el universo físico pertenece a su vez a una totalidad mayor: la realidad objetiva.***

Cada sistema posee una serie de propiedades particulares, esto es, características físicas peculiares que lo identifican, como la presión, la temperatura, la cantidad de materia y el tipo de sustancias que lo componen. Cuando en el transcurso de una medición, las propiedades del sistema que

⁶ Existe una clasificación de los sistemas de acuerdo a la naturaleza de los cambios en otras propiedades diferentes a la energía y a la masa, tal como el volumen o la presión, pero en vista de que la principal propiedad de los sistemas termodinámicos es el intercambio de energía y/o masa, la clasificación aquí dada se considera la principal.

interesan en el estudio de un fenómeno poseen magnitudes determinadas, se dice que el sistema se encuentra en un *estado* determinado, el cambio de dichas magnitudes, trasforma el estado, lo convierte en uno nuevo, tiene lugar un *cambio físico*, mediante un *proceso*, que es la operación u operaciones específica(s) para dicho fin. Si tras un proceso, un sistema retorna al estado inicial, se dice que ha tenido lugar en él un proceso físico cíclico, que ha tenido lugar un *ciclo*. En el estudio de los cambios físicos pueden seguirse dos rutas, una, especificando un estado de partida, efectuando el proceso y determinando un estado final, las variables así determinadas se conocen como *variables de estado*, de ellas sólo interesan, pues, sus valores iniciales y finales tras efectuar un proceso, independientemente de cuantos estados atraviesen para alcanzarse, la otra vía de estudio es, precisamente, especificar los estados intermedios que atraviesa el sistema: la *trayectoria* que recorre el proceso.

Al efectuar procesos en sistemas físicos, puede resultar útil mantener constante alguna o varias propiedades con el fin de observar cómo evolucionan en estas condiciones otras propiedades, en el caso particular de la termodinámica clásica, podemos tener los siguientes tipos de procesos: isocórico, durante el cual se mantiene el volumen constante; isotérmico, manteniendo la temperatura constante, isobárico, a presión constante y adiabático en donde el calor es igual a cero, esto es, no hay intercambio de energía por medio de calor que es la forma de transmisión de energía característica del estudio de la termodinámica y que le da su nombre. El calor junto con los distintos tipos de trabajo son cantidades que fluyen a través de la frontera en virtud de un cambio en las variables de estado del sistema, el trabajo puede emplearse en su totalidad para mover una masa en el entorno y el calor tiende a eliminar una diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno⁷. De este modo se eliminan fuentes de posible error al realizar observaciones sistemáticas, mediciones y experimentos y de hecho, el aislamiento de los procesos es lo que permite la realización de dichos métodos empíricos y con ello la posibilidad de existencia de la ciencia y del conocimiento en general.

⁷ Véase G. W. Castellan, *Fisicoquímica*, 2ª, Wilmington, E.U.A., págs. 107-110.

2.2.- El análisis termodinámico.

La materia en su sentido más general, como realidad objetiva, existe como movimiento, espacio y tiempo, estas tres formas de existencia de la materia se entrelazan en un todo único, pero desde el punto de vista gnoseológico constituyen categorías, esto es, el ser humano no las aprehende en su conjunto, sino que las aísla para una mejor comprensión y luego las reúne en un sistema único. Por ello, una aproximación a la elucidación del problema del concepto de sistema *debe* comenzar de lo más simple e ir a lo más complejo, comenzando por el movimiento, que es una categoría inseparable de dicho concepto y el punto de partida más apropiado con miras a estudiar dicha relación. "Los diversos estados de la materia se conocen sólo a través del movimiento. El movimiento es el hecho evidente con que primero se tropieza el hombre en su actividad práctica y cognoscitiva."⁸

Las propiedades de la materia que son objeto de estudio de la ciencia física son, a saber, energía, trabajo, calor y temperatura, así como sus relaciones recíprocas y todas pueden reducirse a consecuencias de una categoría única: el movimiento de la materia. Ahora bien, el movimiento de la materia tiene, en la ciencia física un ámbito definido, el sistema, aquella porción de materia que se delimita para su estudio, es el lugar donde tienen sentido los conceptos de trabajo, calor y energía, es el ámbito donde tiene sentido la noción de cambio, de movimiento.

2.3.-La conservación de la energía y la primera ley.

En los sistemas macroscópicos simples el trabajo se puede convertir en calor. Puesto que, el análisis de dichos sistemas no puede estar completo sin el balance de la energía correspondiente a todas las formas de movimiento que

⁸ A. G. Spirkin, *Materialismo dialéctico y lógica dialéctica*, México, D. F., 1975, pág. 58.

tienen lugar en el sistema y que son interconvertibles, esto es, se requiere plantear la *función energía del sistema* macroscópico, que incluye, además de la energía mecánica, y de la energía interna; a la energía electromagnética todos los términos correspondientes a los distintos tipos de movimiento que pueden tener lugar en el sistema esto es,

$$U_{total} = \text{energía total} = U_M + U_T + U_E, \quad 2.1$$

Donde:

$$U_M = \text{energía mecánica} = E_c + E_p \quad 2.2$$

y

$$U_T = \text{energía interna} = f(T), \quad 2.3$$

$$U_E = \text{energía eléctrica, que no definiremos.} \quad 2.4$$

Para elucidar la naturaleza del cambio de cada término se requiere entonces reducir el equilibrio global al equilibrio particular, reducir el sistema físico al sistema termodinámico, electrodinámico o mecánico correspondiente es una necesidad metodológica. Para efectuar esto se necesita erradicar toda sobreposición de movimientos, toda "deformación" del movimiento particular. Por ejemplo, los sistemas termostáticos así *purificados* son "... aquellos sistemas simples, definidos como aquellos sistemas que son macroscópicamente homogéneos, isótropos, desprovistos de carga y químicamente inertes, que son suficientemente grandes como para que puedan desprejarse los efectos de superficie, y que no están afectados por campo eléctricos, magnéticos ni gravitatorios."⁹ Estos sistemas simples quedan descritos por los parámetros volumen V , y composición química expresada en determinado número de moles por componente N_1, N_2, \dots, N_r . Además, puesto que un sistema concreto muestra tan "mal comportamiento" ante la generalización, conviene considerar solamente

⁹ H. B. Callen, *Thermodynamics: an introduction to the physical theories of equilibrium thermostatics and irreversible thermodynamics*, Pennsylvania, U.S.A., 1981, pág. 8.

aquellos sistemas que alcancen el equilibrio quedando entonces descartados los sistemas termodinámicos en el transcurso de un proceso, así como aquellos que dependen de su proceso concreto de formación, esto es, de su *historia*, se requiere especificar, además de los parámetros V y N_1, N_2, \dots, N_r , la energía U correspondiente al nivel de organización, la cual fluctuaría en un sistema turbulento.

De manera que U_{total} es igual a la energía interna (U_T) cuando no hay otras formas de movimiento.

Los métodos experimentales sólo permiten determinar los cambios de U y no su magnitud neta, pues se ignoran las variaciones de la energía interna en las eventuales transiciones que dieron origen al sistema mismo y tratándose de un sistema en equilibrio, su historia debe ignorarse.

Dada la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q + W, \quad 2.5$$

Donde:

ΔU = cambio de la energía interna,

Q = calor y

W = trabajo.

La experiencia de "calentar" o "enfriar" los objetos por medio del contacto con otros cuerpos a diferente temperatura, se reduce a un caso particular de la primera ley:

$$\Delta U = Q \quad 2.6$$

cuando no hay trabajo mecánico o eléctrico.

La energía interna, corresponde al movimiento térmico en un sistema termodinámico.

Pero queda claro que la primera ley en la forma $\Delta U - W = Q$ sólo puede emplearse dando por válido el principio de conservación de la energía, principio que indica que *la energía no se crea ni se destruye sino que sólo se transforma, sólo pasa de una clase de movimiento a otra*. Los científicos han observado que su mantenimiento, mediante la consideración de nuevas formas de movimiento de la materia y por tanto, de nuevas escalas o niveles de organización es más conveniente que su rechazo pues así se profundiza en el conocimiento del Universo. Antes de desechar el valioso principio de la conservación de la energía, por un lado perfectamente verificable en el caso de sistemas macroscópicos, los científicos de diferentes épocas han preferido indagar si acaso la ecuación que describe la energía total de un sistema, es decir, la función energía del sistema, requiere nuevos términos que describan mejor el comportamiento del sistema, términos correspondientes a otras clases de movimiento y/o escalas o niveles de organización de la materia, de fenómenos no considerados con anterioridad. Esta parece ser la respuesta más adecuada.

Y no puede ser de otra manera, pues, por principio metodológico, no se puede establecer una forma última de movimiento y, por tanto, de energía; pues no se puede establecer el nivel último de organización de la materia o escala, es decir, si se dijese que una partícula, sea el electrón, es una partícula *fundamental*; última, lo que se estaría diciendo es que dicha partícula carece de estructura interna, lo que conduciría a un callejón sin salida. Si un sistema por minúsculo que sea, carece de estructura interna, carecerá de nexos de causalidad, ¿cómo podría explicarse su comportamiento y sus relaciones con otros objetos si en su interior *nada existe que afectar?*, luego entonces, la aceptación de la necesidad de nexos de causalidad conduce a la aceptación de la necesidad de una estructura interna de *todos* los sistemas. *Entonces, si a cada nivel de organización corresponden formas de movimiento específicas, la energía asociada a éstas debe incorporar un número equivalente de términos a una expresión que reúna la*

contribución de cada nivel de organización a la energía total del sistema, esto es, un número infinito de términos.

Esto conduce a dos conclusiones teóricas importantes:

a.- Como la materia jamás se encuentra en reposo absoluto, el movimiento mismo es infinito y por lo tanto la categoría teórica de movimiento se presenta ante los científicos naturales como el principio de la conservación de la energía, esto es, como la necesidad de incorporar nuevas formas de movimiento al estudio de los sistemas.

b.- La materia es infinita en profundidad y amplitud, de lo contrario carece de sentido la búsqueda de nexos de causalidad¹⁰.

2.4-El sistema termodinámico.

Hablar de cambio, pues, implica que las propiedades del sistema, que son observables, difieren de un momento a otro, especificar el estado de dichas propiedades es lo mismo que especificar el estado del sistema. Realizar esto es en principio posible, pero materializar semejante análisis en una cosa concreta es un esfuerzo impracticable, debido a que la materia posee un número infinito de niveles de organización, cada cual con sus respectivos parámetros y se requiere especificar un número infinito de propiedades para determinar el estado del sistema. Puede simplificarse el análisis considerablemente si el sistema se concretiza únicamente a un nivel de organización, por ejemplo, el macroscópico, que es el punto de partida de esta exposición. Las principales formas de movimiento que tienen por base este nivel son, además de los movimientos mecánico y térmico, el movimiento electromagnético, que se refiere al desplazamiento y reposo de cargas eléctricas y sus consecuencias. El movimiento es, por decirlo así el "eslabón decisivo" de la cadena de las categorías

¹⁰ Sobre estas conclusiones véase S. Meliujin et al., *Problemas filosóficos de la física contemporánea*, México DF., 1969, págs.43-50. también V. I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo*, Pekín R. P. China, 1975 y F. Engels, *Anti-Dühring*, México D. F. 1984.

fundamentales de la materia, a saber: movimiento, tiempo y espacio. El movimiento es el eslabón que no debemos soltar si queremos dominar a la cadena completa, a su vez el movimiento térmico representa una suerte de eslabón decisivo dentro de la cadena del movimiento macroscópico en general.

Aunque en principio y bajo ciertas condiciones, es posible estudiar cada forma de movimiento por separado, lo que ha originado las distintas ramas de la física clásica: mecánica, termodinámica y electromagnetismo, ya que poseen cualidades diversas y conocen un estado de reposo relativo, esto es, cada forma de movimiento conoce un *estado de equilibrio* caracterizado por sus respectivos parámetros. Dicho estado, en el sentido clásico, es uno en el cual las propiedades del sistema poseen una magnitud determinada, relativamente estable al menos durante el proceso de medición. Se hablaría así de un equilibrio mecánico, de un equilibrio termodinámico y de un equilibrio electromagnético, no obstante, las diferentes formas de movimiento presentes en un sistema concreto se influyen mutuamente en forma no aditiva, es decir, el fenómeno principal se encuentra siempre influido por la totalidad de los fenómenos que conforman al sistema y desde luego por la acción del entorno si la frontera lo permite. El sistema se torna *sensible a condiciones iniciales*, fenómeno que es producto de la afectación del fenómeno central por el desenvolvimiento de fenómenos que se influyen unos a otros en forma compleja, de manera que para las leyes generales de la física, el sistema se torna caótico o incomprensible.

Pero existe una jerarquía entre los equilibrios, ya que tanto el movimiento mecánico como el electromagnético pueden transformarse *completamente* en movimiento térmico, en calor, y no a la inversa, el equilibrio termodinámico constituye el equilibrio más simple, las otras formas de movimiento involucran un movimiento de calor en el sistema concreto. Así, cuando el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico, está equilibrado *en general*, otra forma de movimiento involucraría un desequilibrio termodinámico.

Una vez obtenidas las leyes generales de la termodinámica, pueden incorporarse al estudio nuevas formas de movimiento, con miras al estudio completo de los sistemas concretos.

3.- LA ORGANIZACIÓN.

El estudio científico de la organización de la materia por la humanidad tuvo su punto de partida histórico en el desarrollo del concepto de entropía en la termodinámica clásica y ha alcanzado cotas más altas con el desarrollo de la mecánica estadística y la moderna teoría de la información. Este capítulo y el siguiente están dedicados al recuento de las ideas que llevaron a la elaboración del concepto de entropía como *función organización* del nivel macroscópico de la materia. El estudio del concepto de entropía en la termodinámica y en la teoría de la información conducirá a la elaboración de las principales características de la función organización de la materia para cualquier nivel de organización.

3.1-Introducción al concepto de organización.

El movimiento mecánico de un sistema dado tiene por base material la energía mecánica total del sistema, su estado de movimiento se realiza en un marco energético específico, causal, que condiciona sus posibilidades de realización, exceder estas posibilidades implica un cambio en el estado de movimiento del sistema.

En el caso de un sistema mecánico que consiste de un cuerpo bajo la influencia de un campo gravitacional, el término mgh constituye una *energía potencial* (E_p),

$$E_p = mgh,$$

3.1

Donde:

E_p = energía potencial,

m = masa del cuerpo,

g = aceleración debida a la gravedad y

h = altura del cuerpo.

es decir, una cantidad de energía que se encuentra almacenada por el efecto de la fuerza de atracción gravitacional que *jala* al cuerpo en todo momento, se dice que el cuerpo se encuentra bajo la acción de un *campo de fuerza*, al cual no cede gracias a los impedimentos físicos a su movimiento. Por ejemplo, en el caso de una canastilla que pende de una argolla sujeta a un techo y que contiene una esfera:

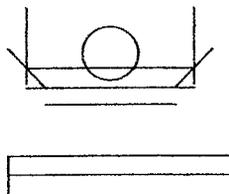


Fig. 2.1 Esfera soportada en una canastilla que pende sobre una mesa.

el impedimento a su movimiento lo representan la argolla y la canastilla.

Pero una vez retirados estos "frenos", la esfera se mueve y libera la energía que anteriormente le permitió vencer la fuerza de los campos que actúan sobre ella.

Estos "frenos", o en términos más apropiados, *restricciones mecánicas*, determinan en primera instancia el paso de una forma de energía a otra, de energía potencial a cinética y viceversa. Una restricción constituye una *ligadura*, se dice que el sistema está *ligado* con respecto a la diferencia de potencial gravitacional, el conjunto de estos elementos posee pues, una determinada disposición de sus componentes que es tal que le permite almacenar energía, y por lo tanto, posee una *organización mecánica* de sus partes.

Pero, ¿cómo puede describirse esta organización mecánica de las partes?
Recúrrase sistema mecánico ideal:

Sean tres cubos de un mismo material rígido y de las mismas dimensiones los cuales se encuentran apilados uno sobre otro

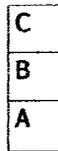


Fig. 2.2 Cubos apilados bajo la acción de un campo gravitacional.

El conjunto de los bloques se considerará un solo sistema de forma que cada bloque o pareja de bloques adyacentes puede considerarse un subsistema de éste en equilibrio mecánico con el resto del sistema. Es decir, los bloques pueden agruparse en las siguientes particiones con respecto al diagrama anterior:

- 1) Tres partes: A, B, C
- 2) Dos partes: (A + B), C y A, (B + C)
- 3) Una parte: (A + B + C).

Quedando excluido (A + C), B, ya que A y C no se encuentran en contacto directo sino a través de B, el cual puede considerarse una interfase mecánica entre A y C y solamente puede considerarse agrupado con A, con B o considerarse un sistema aparte. Considérese en lo sucesivo que el sistema posee la composición descrita en 1), con cada bloque como un subsistema.

Encontrándose dicho sistema bajo un campo de fuerza gravitacional resulta el hecho de que los bloques B y C almacenarán energía en virtud de su distancia con respecto a la base de la columna, esto es, almacenarán energía potencial en una magnitud igual a mgh . La restricción en el ejemplo actual es el impedimento

que representa al movimiento de un bloque el resto de la columna bajo él, debido a una determinada alineación de los ejes de simetría verticales de los cubos, si se pierde esta alineación, esto es, si uno de los cubos es empujado, llegará un punto de transición en que el cubo resbalará y caerá. Por simplicidad supóngase que cualquier desalineación de los ejes de simetría conduce a una caída del cubo, es decir, un cubo forma parte del sistema si se encuentra perfectamente alineado con el resto.

Así, al empujar un cubo y provocar su caída ocurre un proceso de liberación de energía potencial que se transforma en energía cinética la cual puede aprovecharse en principio para generar trabajo fuera del sistema. Esto es, el retiro de una restricción genera trabajo útil, al menos en principio. Y el sistema resulta con menos energía que antes del proceso, la diferencia entre la energía previa y su magnitud después del proceso es el trabajo liberado si se desprecian efectos de fricción.

Ahora bien, existen otros tipos de movimientos que *se le permitirán* efectuar al sistema. Ya que se ha supuesto que los cubos son del mismo material y de la misma densidad, pueden alternarse, o sea, cambiar su orden en la columna desde la secuencia inicial hasta las secuencias A-C-B, B-C-A, B-A-C, etc., sin que se modifique la energía total del sistema. Además pueden alternarse sus caras, es decir, se puede hacer girar los cubos sobre la columna de manera que cada bloque tiene seis opciones, la cantidad de opciones para la columna es $6 \times 6 \times 6 \times 6 = 1296$ opciones, estas opciones se combinan para dar *formas alternativas* del sistema o *distribuciones* de la energía potencial y del espacio en los elementos del sistema, aunque es claro que estas alternativas son mecánicamente equivalentes pues no modifican la energía potencial contenida en el sistema. Las partes integrantes del sistema interaccionan en el marco de estas formas, los cambios de una forma a otra no afectan la naturaleza mecánica del sistema. Caso contrario ocurre cuando tiene lugar un proceso como la caída de un bloque, sea por ejemplo el C de la figura, supóngase que el bloque sólo puede ocupar un lugar adyacente

a la columna, esto es, puede situarse en cuatro posiciones alrededor de la columna, ahora el sistema tiene $6 \times 6 \times 2 \times 6 \times 4 \times 3 = 5184$ alternativas. Al caer al suelo se pierde la interacción mecánica entre este y el resto del sistema, sus movimientos futuros pierden relación, *se dice que el sistema pierde organización pues sus partes pierden dependencia mutua y esto se expresa con un aumento de las formas alternativas del sistema*, pues el bloque caído y el conjunto formado por los otros cubos pueden asumir, uno con respecto al otro, múltiples posicionamientos sobre el suelo.

Es más que evidente entonces la relación entre la organización y las restricciones con la *forma* del sistema y que dicha organización debe cuantificarse en términos del número de formas alternativas o distribuciones del sistema. Así, un aumento en el número de alternativas implica una disminución de la organización del sistema y a la inversa, una disminución de alternativas representa un aumento en la organización del sistema. *La organización es una función de la cantidad de formas del sistema.*

3.2.- La entropía.

En la entropía se encuentra desarrollado prácticamente el concepto de función organización, como se verá en adelante.

3.2.1.- Ley cero de la termodinámica

Una característica general de la naturaleza es el desdoblamiento de los fenómenos que la constituyen en tendencias opuestas, ejemplos de esto pueden ser: carga positiva y carga negativa, polo norte y polo sur en el movimiento electromagnético, suma y resta, multiplicación y división y derivación e integración en matemáticas, por dar unos pocos ejemplos. Cada término componente de dicho desdoblamiento presupone la existencia de su opuesto aunque esto no implica que ambos coexistan en todo momento en un sistema dado, podemos

tener un cuerpo con carga neta positiva aislado de cualquier carga negativa, pero un tipo de carga presupone la existencia de la otra y al entrar en contacto ambas interaccionan en forma característica.

Algo similar ocurre con el movimiento térmico, la descripción del estado de un sistema macroscópico en estudio puede realizarse especificando el estado de movimiento de cada partícula, mismo que puede tener magnitudes diversas, otra alternativa es describir al sistema en su conjunto por medio de promedios estadísticos de sus propiedades medibles, su comportamiento adquiere un carácter *estadístico*; esto es, la descripción del conjunto se hace más manejable por medio de promedios estadísticos que por la descripción separada del movimiento de cada partícula. Esta última descripción se vuelve el aspecto dominante, surge una nueva propiedad del sistema, la temperatura macroscópica, que representa la superación del desdoblamiento entre descripción puntual y descripción estadística del estado del sistema, que no puede reducirse a una resultante simple del movimiento de las partículas del sistema, y que siendo producto del "triunfo" de la descripción estadística es aparentemente una vuelta al pasado pues puede manejarse como un valor puntual de un sistema macroscópico por nuestros sistemas de medición, los termómetros. Es decir, tiene lugar un salto dialéctico que transforma el aparente desorden o caos microscópico en un macroorden, lo que se refleja en la contradicción dialéctica de que un parámetro macroscópico (la temperatura) tenga por base un parámetro microscópico (la energía de las partículas), contradicción dialéctica que se sintetiza en el hecho de que el parámetro macroscópico es un índice estadístico; lo cual es como si la descripción estadística representara el único puente para abordar el desordenado comportamiento microscópico. Como bien dice S. Meliujin: "... toda cualidad concreta existe dentro de determinados límites de medida y no puede adoptar valores cuantitativos ni infinitamente grandes ni infinitamente pequeños. Eso se desprende de la ley general de transición de los cambios cuantitativos a cualitativos, según la cual, las transformaciones cuantitativas del estado y las propiedades de los objetos materiales conducen en determinada fase a

variaciones cualitativas radicales. La nueva cualidad poseerá diferentes características cuantitativas y se subordinará a una ley de desarrollo distinta.”¹¹

“...y se subordinará a una ley de desarrollo distinta”, esta última línea indica la posibilidad de subsecuentes desdoblamientos de la nueva cualidad. En el caso de la temperatura tiene lugar un desdoblamiento en lo que respecta a la magnitud de la temperatura de diferentes sistemas, sistemas con diferentes temperaturas acaban oponiéndose.

Dicha oposición se materializa cuando los cuerpos se ponen en contacto e intercambian energía alcanzando el equilibrio térmico que puede dar como resultado una nueva temperatura que no es igual a sus predecesoras. Aunque como se indicó, la oposición se encuentra ya en el hecho de que los sistemas posean temperaturas distintas aunque no se encuentren en contacto, si este es el caso, se requiere un sistema adicional que se equilibre sucesivamente con los dos o más cuerpos para determinar su temperatura por separado, dicho cuerpo no es otra cosa que el termómetro. Esta es la ley de desarrollo de la temperatura y se conoce como *ley cero de la termodinámica*: dos sistemas separados se encuentran en equilibrio térmico entre sí cuando se encuentran en equilibrio térmico con un tercero.

Esta ley estableció firmemente la existencia de un “*potencial térmico*”, es decir, *una dirección causal, necesaria, del calor* : éste se propaga desde los cuerpos de temperatura más alta hacia los de temperatura más baja. ¿Pero siempre y en cualesquiera condiciones debe ocurrir así?, esta cuestión amerita un mayor detenimiento.

¹¹ S. Meliujin, M. Omelianovski, y L. V. Kutnetsov, *Problemas filosóficos de la física contemporánea*, México D. F., 1969, pág. 23.

3.2.2- Máquinas térmicas y refrigeradores

Bien puede afirmarse que la respuesta a la cuestión del apartado anterior de hecho la antecedió. Es significativo el hecho de que la ley cero no se estableció hasta la década de 1930¹², cuando el cuerpo de conocimiento de la termodinámica clásica tenía décadas de haberse establecido.

El manejo de diferencias de temperatura se remonta a los antiguos griegos: "La primera máquina térmica de que tenemos evidencia escrita fue descubierta por Hero de Alejandría (~130 a. C.) y llamada la aeolipila. Es una turbina de vapor primitiva que consiste de un globo hueco soportado por un pivote de manera que pueda girar alrededor de un par de muñones, uno de ellos hueco. Por dicho muñón se puede inyectar vapor de agua, el cual escapa del globo hacia el exterior por dos tubos doblados y orientados tangencialmente en direcciones opuestas y colocados en los extremos del diámetro perpendicular al eje del globo. Al ser expelido el vapor, el globo reacciona a esta fuerza y gira alrededor de su eje."¹³

La primitiva máquina de Hero de Alejandría demostró experimentalmente la posibilidad de transformar el calor en trabajo, exactamente lo opuesto a los experimentos de Rumford y de Joule. La utilidad potencial de este principio se exploró a lo largo de los siglos XVI al XIX cuando la producción desarrolló un gran número de máquinas-herramienta como ruelas, molinos y telares que se servían de la fuerza humana o de la de animales para realizar sus tareas, lo que a la postre se convirtió en un límite para la expansión de dicha producción, pues era necesario desarrollar fuentes de energía a bajo costo y en abundancia como nunca antes en la historia, entonces se recurrió a la energía del viento y de las caídas naturales de agua; pero entonces la ubicación geográfica de las fábricas se convirtió en una limitación ya que había que construirlas cerca de las cascadas o en lugares con viento constante y abundante, se comprendió en ese momento que

¹² R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, *Física*, 4a, México D. F., 1996, pág. 549.

¹³ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., págs. 11 y 12.

el progreso industrial debía romper también esta barrera y el dinero comenzó a fluir a los ingenieros que experimentaban con el vapor, cuyos primeros trabajos prometían echar abajo las barreras a un abasto ilimitado de energía, haciendo posible el surgimiento de la producción fabril. El primer ingenio de vapor se empleó para el bombeo de agua de las minas o el transporte de la misma, consistía en un recipiente caldeado cuyo interior se llenaba de vapor de agua, y una vez lleno se enfriaba bañando su exterior con agua líquida haciendo que el vapor se condensase generando un vacío, si se conectaba un tubo desde este recipiente hacia el agua que se deseaba mover esta podía succionarse por la acción del vacío, entonces se repetía el proceso en el recipiente caldeado. Este ingenio fue obra del ingeniero inglés Thomas Savery en 1698. Posteriormente, Thomas Newcomen introdujo un pistón en una máquina de vapor que trabajaba a bajas presiones de manera que el trabajo del vacío se ejercía a través de dicho pistón y no directamente en el líquido a bombear. El ingenio de Newcomen fue mejorado notoriamente en 1769 por el mecánico escocés James Watt, en cuya máquina la condensación tenía lugar en un recipiente diferente al de calentamiento, esto es, un recipiente se mantenía caliente y enviaba vapor de agua a otro que se mantenía a baja temperatura donde ocurría la condensación. Esta máquina trabajaba entre dos reservas de temperatura diferenciadas al contrario de sus antecesoras cuya diferencia de temperatura tenía lugar en un mismo recipiente, lo cual aumentó sensiblemente la eficiencia del proceso, ya que calentar y enfriar sucesivamente una misma caldera representa un gasto inútil de energía. Posteriormente el propio Watt y otros realizaron mejoras técnicas permitiendo que la máquina de vapor no quedara limitada al bombeo de agua, de forma que en 1787 la fuerza del vapor ya movía barcos y en 1814 se construyó la primera locomotora funcional de vapor, sin hablar ya de la introducción del vapor como fuente de poder en la maquinaria industrial en la primera mitad del siglo XIX en Inglaterra. Ahora la industria capitalista contaba con una fuente segura de energía para expandir la cantidad y calidad de la producción mercantil¹⁴.

¹⁴ Véase I. Asimov, *Introducción a la ciencia*, Barcelona, España, 1973 y L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., págs. 11-17.

Es de resaltar que este impresionante avance tecnológico no correspondió, al momento de realizarse, con una explicación científica del funcionamiento de tales máquinas térmicas y de hecho la antecedió.

3.2.3.-Ciclo de Carnot

En la década de 1820, el ingeniero francés Nicolás Leonard Sadi Carnot se planteó la problemática sobre el razonamiento de lo fundamental del funcionamiento de las máquinas térmicas. Se planteó la cuestión de idear una máquina de máxima eficiencia, esto es, una máquina que aproveche al máximo el calor de la fuente de mayor temperatura para generar trabajo útil, así como elucidar de qué factores depende dicha eficiencia, su trabajo fue, en suma, un esfuerzo pionero y fructífero.

Dicha máquina consistió en una serie de procesos que operaban en ciclos y se denominó Ciclo de Carnot. Dicho ciclo opera en una máquina compuesta por un gas confinado en un cilindro con un pistón móvil que soporta una masa m y se compone de las siguientes fases:

1.- **Una expansión isotérmica:** el cilindro se pone en contacto con la fuente de calor de mayor temperatura con el cual el gas se encuentra en equilibrio térmico, de manera que al retirar una parte de la masa que reposa sobre el pistón el gas se expande sin que su temperatura se modifique ya que absorbe calor de la fuente, el cual genera trabajo pV .

2.- **Una expansión adiabática:** el cilindro se retira del contacto con la fuente caliente pero continúa expandiéndose al retirar otra porción de masa, por lo cual su temperatura disminuye hasta alcanzar la de la fuente de menor temperatura, generando trabajo pV .

3.- **Una compresión isotérmica:** el cilindro se pone en contacto con la fuente de baja temperatura y se coloca peso sobre el pistón, el gas se comprime pero no aumenta su temperatura pues fluye calor hacia la fuente fría, lo que provoca que se destruya trabajo pV en el entorno.

4.- **Una compresión adiabática:** el cilindro se aísla de la fuente fría, pero continúa comprimiéndose por adición de masa sobre el pistón hasta que el gas alcanza la temperatura de la fuente caliente destruyéndose trabajo en el entorno y entonces se reinicia el ciclo.

Como se observa en la figura.

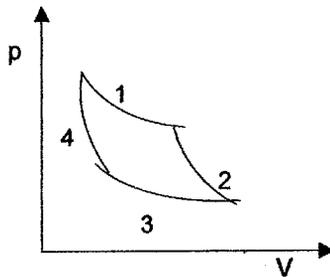


Fig. 3.1 Ciclo de Carnot.

Una máquina térmica operando en ciclos de Carnot transfiere calor de la fuente de mayor temperatura a la de menor temperatura y transforma parte de ese calor en trabajo útil en las fases de expansión en magnitud superior al trabajo destruido (destruido en tanto que trabajo) en las fases de compresión, resultando una producción neta de trabajo útil en el entorno, sin que se operen cambios netos en el sistema operante, la diferencia entre la máquina de Carnot y las máquinas concretas radica en el hecho de que la primera elimina las fugas de calor parásitas debidas a la operación del proceso que tendrían lugar si al entrar en contacto el cilindro con las fuentes de calor, no estuviesen en equilibrio térmico.

El trabajo desarrollado es de igual magnitud a la diferencia entre el calor emitido por la fuente caliente y el recibido por la fuente fría, como se muestra en la siguiente figura:

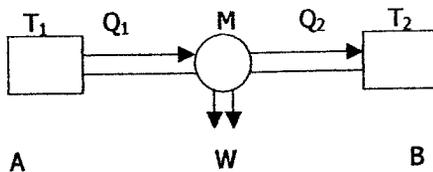


Fig. 3.2 Máquina térmica operando entre dos fuentes de calor.

Donde A y B son las fuente caliente y la fuente fría respectivamente y M la máquina térmica, de manera que

$$|Q_1| = |W| + |Q_2| \quad \text{ó} \quad 3.2$$

$$|W| = |Q_1| - |Q_2|. \quad 3.3$$

La eficiencia ε del proceso estará definida como la razón del trabajo sobre el calor emitido por la fuente caliente:

$$\varepsilon = \frac{|W|}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad 3.4$$

Se requiere poner ahora el cociente Q_2/Q_1 en términos de temperatura, lo cual se obtiene de la siguiente manera:

Tanto Q_2 como Q_1 son iguales en magnitud a dos componentes del trabajo neto que tienen lugar en las fases 1 y 3 del ciclo, entonces,

$$|Q_1| = |W_1| \quad \text{y} \quad 3.5$$

$$|Q_2| = |W_2|, \quad 3.6$$

como la máquina opera con un gas ideal:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad 3.7$$

De manera que:

$$|Q_1| = |W_1| = nRT \ln\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad \text{y} \quad 3.8$$

$$|Q_2| = |W_3| = nRT \ln\left(\frac{V_\gamma}{V_\delta}\right) \quad 3.9$$

y de esta manera,

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{[T_1 \ln \frac{V_\gamma}{V_\delta}]}{[T_2 \ln \frac{V_\beta}{V_\alpha}]} \quad 3.10$$

Como

$$T_1 V_\beta^{\Gamma-1} = T_2 V_\gamma^{\Gamma-1} \quad \text{y} \quad T_1 V_\alpha^{\Gamma-1} = T_2 V_\delta^{\Gamma-1}, \quad 3.11$$

Donde

$$\Gamma = \frac{C_p}{C_v}, \quad 3.12$$

C_p y C_v son las capacidades caloríficas a presión constante y volumen constante, respectivamente, de manera que:

$$\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} = \frac{V_7}{V_6} \quad 3.13$$

y por lo tanto,

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad 3.14$$

Lo que permite describir la eficiencia de las máquinas de Carnot en términos de la temperatura,

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad 3.15$$

La eficiencia de una máquina térmica nunca alcanza el 100%.

Como Carnot bien supuso: *“La eficiencia” ... de esta máquina ... “depende únicamente de la temperatura de los dos depósitos entre los que opera”*¹⁵, es decir, la esencia del fenómeno del transporte de calor es la diferencia de temperaturas. Sobre el cimiento de la temperatura se ha levantado un edificio nuevo, el del intercambio y aprovechamiento del calor.

Carnot aisló en su configuración más pura el fenómeno central del aprovechamiento del calor como fuente de trabajo útil, lo cual le permitió enunciar un teorema generalizable a cualquier máquina térmica:

“La eficiencia de cualquier máquina térmica que opere entre dos temperaturas específicas nunca podrá superar la eficiencia de un máquina Carnot que opere entre las mismas dos temperaturas”¹⁶.

¹⁵ R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, *Física*, 4a, México D. F., 1996, pág. 642.

¹⁶ *Ibidem*.

La ley cero establece que los sistemas en contacto tienden causalmente a alcanzar el equilibrio térmico, esto es, que el calor fluye de una fuente de mayor temperatura a una de menor temperatura. El estudio de las máquinas térmicas nos permite saber que parte de ese flujo puede transformarse en trabajo.

Pero esta problemática presupone su opuesto, ¿bajo qué condiciones puede invertirse el flujo "natural" del calor entre una diferencia de temperaturas? Y, ¿acaso puede ocurrir esta inversión en forma igualmente "espontánea"?

3.2.4.-Definición de entropía

Para responder estas cuestiones conviene retomar la ecuación 3.14,

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad 3.14$$

pues encierra grandes consecuencias teóricas.

Reordenándola resulta:

$$\frac{|Q_2|}{T_2} - \frac{|Q_1|}{T_1} = 0 \quad 3.16$$

Y utilizando el valor absoluto:

$$\frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0 \quad 3.17$$

Esta ecuación 3.17 indica que el cociente Q/T corresponde a una cantidad que se conserva en un ciclo reversible, y además es una propiedad del sistema

operante que se modifica con cada proceso de intercambio de calor. Esta propiedad se denomina **entropía del sistema**, pero conviene determinar si dicha conservación se observa en cualquier ciclo reversible o sólo en un ciclo de Carnot. Para ello se representa un ciclo cualquiera sobre el diagrama pV.

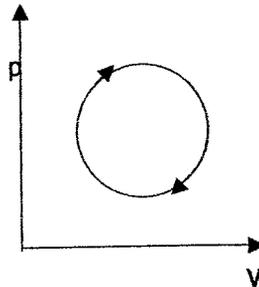


Fig.3.3 Proceso cíclico reversible no necesariamente de Carnot.

Ahora bien, este ciclo puede reducirse a un conjunto de ciclos de Carnot:

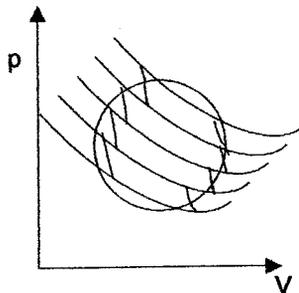


Fig. 3.4 Reducción de un ciclo reversible a sus correspondientes ciclos de Carnot.

Sumando para todos los ciclos de Carnot involucrados, se obtiene que,

$$\sum \frac{Q_{rev}}{T} = 0, \quad 3.18$$

Donde Q_{rev} indica que el intercambio de calor a través de todos los ciclos es reversible. Y si las diferencias de temperatura entre los ciclos son infinitesimales, entonces la ecuación anterior se escribe:

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0, \quad 3.19$$

donde \oint designa la operación de integración en ciclos.

Ahora puede definirse el cambio de entropía en el sistema a través de un ciclo reversible de cualquier tipo como:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}, \quad 3.20$$

integrando para un ciclo de Carnot simple:

$$\Delta S = 0 \quad 3.21$$

de lo que se desprende que cada término Q/T designa un cambio ΔS en cada parte del ciclo de Carnot de igual magnitud pero de signo contrario, de manera que en cualquier ciclo reversible, el aumento de entropía en un proceso se neutraliza por una disminución de la entropía en idéntica magnitud al retornar el sistema a su punto de partida, resultando:

$$\oint dS = 0, \quad 3.22$$

para cualquier ciclo reversible.

La entropía es una propiedad extensiva del sistema pues su medición debe realizarse con la totalidad del sistema, es además una propiedad de estado, como

la energía o la temperatura pues a diferencia del calor o el trabajo no depende de la sustancia operante y por tanto no depende de la trayectoria del proceso solo de los estados final e inicial del sistema, de ahí que resulte una diferencial exacta.

De este modo, el límite a la eficiencia de las máquinas térmicas que depende exclusivamente de la diferencia de temperaturas entre sus fuentes de calor, implica que $\oint dS = 0$ en cualquier ciclo reversible, constituyendo un límite insalvable ya que necesariamente una determinada cantidad de calor debe alcanzar la fuente fría o de lo contrario no se establece la diferencia de temperaturas.

Esto lleva a la conclusión de que: "*Es imposible construir una máquina que operando en ciclos no haga otra cosa más que extraer calor de un cuerpo y convertirlo íntegramente en trabajo*"¹⁷, es decir, que una máquina térmica no puede tener una eficiencia mayor a la de la máquina de Carnot, este enunciado se conoce como el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica. Cuando se habla de que "no haga otra cosa que..." se indica que ir contra el sentido causal de la ley cero requiere el concurso de un agente externo que aporte energía al sistema como trabajo útil.

Esto sienta las bases para responder a los cuestionamientos de partida:

Se requiere un agente externo para revertir el curso del calor que dicta la ley cero de la termodinámica, haciendo que disminuya la entropía del sistema, dicho agente debe incorporar trabajo útil al sistema, el esquema de dicha operación es:

¹⁷ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F. 1994, pág.52.

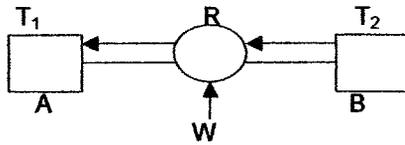


Fig. 3.5 Refrigerador operando entre dos fuentes de calor.

En donde A es la fuente de mayor temperatura y B la fuente de menor temperatura, por lo que $T_1 > T_2$ y R es el sistema operante recíproco a la máquina térmica y que se denomina *refrigerador*. De esta experiencia se desprendió un enunciado de la segunda ley: "Es imposible construir una máquina, que operando en ciclos no haga otra cosa que extraer una cierta cantidad de calor y llevarlo de un cuerpo frío a otro más caliente"¹⁸, conocido como el enunciado de Clausius.

La segunda ley de la termodinámica prohíbe entonces la existencia de un *perpetuum mobile* de segunda clase, esto es, un aparato que extrayendo calor del entorno genere trabajo útil.

¹⁸ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F. 1994, pág.49.

4.-LAS PROPIEDADES DE LA ENTROPÍA.

4.1.-Propiedades de la entropía.

La entropía es una función continua y diferenciable que depende de los parámetros extensivos del sistema en tanto que ella misma es un parámetro extensivo, de modo que:

$$S = S (U, V, N_1, \dots, N_r) \quad 4.1$$

Y si se simplifica más el sistema manteniendo la composición constante:

$$S = S (U, V)_N \quad 4.2$$

Esto es, si el sistema sólo realiza trabajo mecánico de tipo pV, la entropía sólo depende del cambio de energía interna y del cambio de volumen.

Sea la definición de entropía,

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad 4.3$$

como $dQ_{rev} = dU + pdV$, entonces

$$dS = \frac{dU}{T} + p \frac{dV}{T} \quad 4.4$$

que es la forma operacional de 4.2. Es una combinación de las leyes primera y segunda y se denomina "ecuación fundamental de la termodinámica".

Para analizar las consecuencias de esta expresión conviene tomar el sistema macroscópico más sencillo, el estado gaseoso ideal. Como $dU = C_v dT$ y $p = n R T V^{-1}$, la ecuación fundamental se escribe como sigue:

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + \frac{nRT}{T} \frac{dV}{V} = C_v \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V} \quad 4.5$$

Como el C_v puede expresarse en términos de fracciones de R , puede escribirse

$$dS = nzR \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}, \quad 4.6$$

donde

n = número de moles y

$$z = \frac{C_v}{R}. \quad 4.7$$

Integrando esta ecuación se obtiene

$$\Delta S = znR \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad 4.8$$

Multiplicando el segundo término por k/k , donde k es la constante de Boltzmann,

$$\Delta S = \frac{znRk}{k} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{nRk}{k} \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad 4.9$$

Como $R k^{-1} = N_A$,

$$\Delta S = zkN_A \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nkN_A \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right), \quad 4.10$$

ya que, $n N_A$ es igual al número de partículas del sistema N ,

$$\Delta S = zkN \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + kN \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad 4.11$$

Reordenando,

$$\Delta S = zk \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^N + k \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^N \quad 4.12$$

Para comprender el significado de este planteamiento de la ecuación fundamental, es preciso formular un modelo de la estructura del sistema como sigue:

Supóngase que el sistema se encuentra conformado por un cilindro provisto de un pistón móvil, en su interior contiene un gas, el volumen interior puede modelarse como sigue:

Supóngase una caja con cinco subdivisiones en la cual pueden alojarse hasta cinco esferas, una por subdivisión. Si se tiene solamente una esfera, esta puede colocarse en cinco posiciones distintas, suponiendo que puede alojarse con igual probabilidad en cualquier partición de la caja, el número de arreglos de la esfera es $\mathcal{N} = 5$, o sea, es igual al número de espacios dentro de la caja. Ahora se tienen dos esferas, tras incorporar la primera, la segunda encontrará que un espacio ya ha sido ocupado y tendrá que distribuirse en los restantes, el número de arreglos que puede adquirir es $\mathcal{N} - 1 = 4$, y así sucesivamente. Cuando se tenía una sola esfera, la configuración del sistema tenía cinco opciones equivalentes:

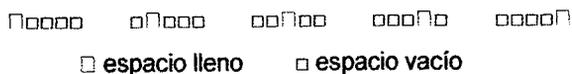


Fig. 4.1 Modelo del gas ideal como caja con esferas.

es decir, si se observase la situación de la caja en un momento dado, se visualizaría cualquiera de estos estados diferentes, que se denominan *microestados*, pero todos poseen algo en común que los hace equivalentes y que aparece en todas las observaciones: una partición ocupada entre cinco, esto constituye el *macroestado* del sistema. El número de microestados (Ω) con una sola esfera es N , con dos esferas hay que multiplicar el número de arreglos para cada esfera y resulta

$$\Omega = \frac{1}{2} N (N - 1), \quad 4.13$$

se divide entre dos para no repetir arreglos, o sea, microestados ocupados, y así sucesivamente.

Ahora supóngase que la caja aumenta el número de subdivisiones útiles para alojar esferas, sea por ejemplo, al doble. Tiene lugar un proceso que redundará en el cambio del número de microestados, la expresión que manifiesta este cambio es:

$$\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1, \quad 4.14$$

manejando logaritmos naturales para mayor comodidad:

$$\Delta \ln \Omega = \ln \Omega_2 - \ln \Omega_1 = \ln \left[\frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right] \quad 4.15$$

y sustituyendo las expresiones de probabilidad,

$$\Delta \ln \Omega = \ln \frac{N^*(N^* - 1)}{N(N - 1)} \quad 4.16$$

donde N = número de arreglos del sistema con una esfera antes del proceso y
 N^* = número de arreglos del sistema con una esfera después del proceso.

se obtiene la expresión completa para el modelo con una caja y esferas. Para trasladar este resultado a un gas confinado hay que considerar el hecho de que se trabaja con una cantidad de subdivisiones muy grande, de miles de millones o más, por tanto, puede considerarse que cada partícula se comporta individualmente como si se encontrase sola, en lo que respecta a su probabilidad de ocupar una u otra partición, por lo cual, la cantidad $(N^* - 1)$ es prácticamente igual a N^* , y, análogamente, la cantidad $(N - 1)$ es prácticamente igual a N , de modo que

$$\Delta \ln \Omega = \ln \frac{N^* N^*}{N N} = \ln (N^* N^{-1})^2 \quad 4.17$$

es la expresión para dos partículas, generalizada para un número N de partículas se describe como:

$$\Delta \ln \Omega = \ln (N^* N^{-1})^N \quad 4.18$$

Como en el cilindro de gas el número de subdivisiones depende del volumen interior del sistema y del volumen estimado de las partículas, entonces:

$$N^* = \frac{V_f}{V_{par}} \quad 4.19$$

Donde V_f es el volumen después del proceso y V_{part} el volumen de la partícula. Análogamente:

$$N = \frac{V_f}{V_{part}} \quad 4.20$$

Donde V_i es el volumen anterior al proceso. Sustituyendo estas expresiones en 4.18 resulta

$$\Delta \ln \Omega = \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)^N \quad 4.21$$

En la que se relaciona el cambio de volumen del sistema con un cambio en la probabilidad del mismo, de su número de microestados.

Haciendo $V_f = V_2$ y $V_i = V_1$ y sustituyendo en la ecuación fundamental resulta

$$\Delta S = zk \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N + k \Delta \ln \Omega \quad 4.22$$

Es lógico suponer que también el factor $\ln (T_2 T_1^{-1})^N$ implica una "magnitud probabilística" como la implicó el factor $\ln (V_f V_i^{-1})^N$, debido a que la temperatura, también es un concepto estadístico. Para determinar si es así, es necesario modelar el sistema en términos de energía para relacionarlo de esta manera con la temperatura. Considérese que cuando el sistema se encuentra a una temperatura dada, las diferentes partículas poseen un valor determinado de energía cinética, y que agrupando estas partículas de acuerdo a su magnitud en grupos, como esferas de diferente color en diferentes casilleros, se obtiene una

distribución, que como indicó Maxwell oscila en torno a un valor promedio donde se agrupa el grueso de las partículas.

Comencemos por un sistema de solo cinco partículas, al principio únicamente con dos magnitudes de energía, y las partículas se distribuyen en estos como sigue



Donde ϵ_1 y ϵ_2 representan los niveles de energía 1 y 2 respectivamente y \bullet representa cada partícula.

Fig. 4.2 Distribución de partículas en dos niveles de energía.

El número de arreglos que pueden obtenerse de esta forma es

$$\Omega = \frac{N!}{n_1!n_2!} = \frac{5!}{3!2!} = 10$$

Supóngase ahora que una partícula del segundo nivel aumenta su energía por acción de un agente externo, entonces se forma un nivel de energía nuevo n_3 y el número de arreglos (microestados) se modifica:

$$\Omega = \frac{N!}{n_1!n_2!n_3!} = \frac{5!}{3!1!1!} = 20$$

Esto es, la ampliación de la distribución por el aumento de energía genera un incremento del número de microestados.

Trasládese ahora este resultado al gas, paralelamente hay que manejar un número muy grande de partículas que se acumulan en torno a un valor promedio de energía dado por la distribución de Maxwell.

Si se considera que N es muy grande y que sólo una partícula se encuentra en un nivel superior al promedio, entonces,

$$\Omega = \frac{N!}{(N-1)!0!0!} = N$$

Si damos por válida la hipótesis de que un aumento de energía de las partículas sin que el número de éstas aumente causa que algunas de ellas se apropien de ese excedente, pasando en los hechos a formar nuevos niveles de energía y que el cambio de estado que se efectúa es tan pequeño que virtualmente $\langle \epsilon_1 \rangle \approx \langle \epsilon_2 \rangle$, entonces:

$$\ln(\Omega_2 - \Omega_1) = \ln(\Omega_2 \Omega_1^{-1}) = \ln(N_2 N_1^{-1})^5 \quad 4.23$$

para cinco partículas o extracciones. Y como

$$N_2 = \frac{U_2}{\langle \epsilon_2 \rangle} \quad \text{y} \quad N_1 = \frac{U_1}{\langle \epsilon_1 \rangle} \quad 4.24$$

Donde U_2 y U_1 son la energía interna del sistema antes y después del proceso respectivamente. Entonces,

$$\ln\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right) = \ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^5 \quad 4.25$$

para un sistema con muchas partículas tenemos:

$$\ln\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right) = \ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^N = \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^N \quad 4.26$$

Sustituyendo este resultado en la ecuación fundamental se obtiene la expresión:

$$\Delta S = zk \ln \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right) + k \ln \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1} \right), \quad 4.27$$

y si $z = 1$

$$\Delta S = k \ln \Omega_2 - k \ln \Omega_1, \quad 4.28$$

y por lo tanto,

$$S = k \ln \Omega, \quad 4.29$$

que se conoce como la ecuación de Boltzmann para la entropía, y que relaciona directamente la entropía con el número de microestados o arreglos estadísticos del sistema.

Las partículas de un sistema determinado se distribuyen entre determinados niveles de energía y entre determinados elementos de volumen, y sus posibles arreglos constituyen las dos contribuciones a la entropía de un gas. Como indica G. W. Castellan: "Las dos posibilidades fundamentales para variar la entropía de un sistema, expresadas por la ecuación fundamental, se interpretan como las dos formas de alcanzar una distribución más amplia. Aumentando el volumen, la distribución espacial se amplía, y aumentando la energía, la distribución energética también se amplía."¹⁹ La ecuación de Boltzmann constituye un notable logro de la mecánica estadística.

¹⁹ G. W. Castellan, *Fisicoquímica*, Wilmington, E.U.A., 1987, pág. 208.

4.2.-Entropía y organización.

Puesto que k , la constante de Boltzmann, es precisamente eso, una constante universal, la entropía propiamente dicha está dada por el cambio del número de microestados, de manera que:

$$\Delta S = k(\ln \Omega_2 - \ln \Omega_1) = zk \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N + k \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^N, \quad 4.30$$

dividiendo todo entre k ,

$$\Delta \ln \Omega = z \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N + \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^N \quad 4.31$$

Donde, como se recordará, $z = C_v R^{-1}$.

Así, el cambio en el número de microestados constituye una definición alterna de la entropía:

$$\Delta S = \ln \Omega_2 - \ln \Omega_1. \quad 4.32$$

Para comprender el significado físico de esta expresión, y con ella, la de Boltzmann y la interpretación estadística de la entropía es necesario pasar a otro campo del conocimiento muy distinto: La teoría de la información.

Durante la segunda guerra mundial se planteó la necesidad de diseñar aparatos para dirigir el fuego de la artillería antiaérea. Con el fin de lograr esto es necesario pronosticar la trayectoria de la aeronave que se quiere derribar. Los científicos Norbert Wiener y J. M. Bigelow en Estados Unidos y por otro lado A. N.

Kolmogórov en la U.R.S.S., se abocaron en los años 1940-41 a desarrollar una teoría de la predicción. "Aproximadamente en esa fecha (1941) Wiener y Bigelow llegaron a la conclusión de que los problemas referentes a la técnica de la dirección y la técnica de las comunicaciones son inseparables unos de otros, y que el concepto que los une es el de la comunicación (message) como una secuencia ininterrumpida o continua de acontecimientos (events) medibles distribuidos en el tiempo."²⁰ Por lo cual : "Surgió la necesidad de elaborar la teoría estadística de la información (comunicación)"²¹. Esto es, asignarle cualidades métricas a la información: "La idea de la cantidad de información (amount of information), como su unidad de medida les surgió casi simultáneamente a R. A. Fisher, conocido estadístico inglés, a C. Shannon, del laboratorio telefónico de la compañía Bell y a Wiener."²² Aunque cada uno partió de diferentes puntos de vista: "A Fisher le sugirieron esta idea los principios de la teoría clásica de la estadística, a Shannon el proceso de codificar las comunicaciones, y a Wiener el relacionado con el ruido y la señal en los filtros eléctricos."²³

El resultado fue la teoría de la información. El objeto de esta teoría lo constituye un sistema formado por una fuente de información, un receptor de información y un canal que conecta a ambos y es el puente de que se vale la información para ir de la fuente al receptor. Este esquema general abarca lo mismo líneas telegráficas y telefónicas, que transmisiones radiales o el acto mismo de la conversación humana.

Cada sistema posee un repertorio determinado de mensajes susceptibles de transmitirse, sin importar el significado de lo que se transmite, por ejemplo, un telegrafista puede lo mismo transmitir una obra de Aristóteles que una amalgama de letras sin sentido. El repertorio de la clave Morse consiste pues, únicamente de las letras del alfabeto. El repertorio del telégrafo es aún más reducido, sólo una

²⁰ A. V. Jramoi, *Introducción e historia de la cibernética*, México D. F., 1975, pág. 87.

²¹ *Ibidem*, pág. 88.

²² *Ibidem*, pág. 87.

²³ *Ibidem*.

raya y un punto, así el valor informativo métrico de cada elemento del repertorio se determina por su imprevisibilidad, "...sólo la ocurrencia de hechos imprevisibles trae información"²⁴, es decir, se determina por su probabilidad de ocurrencia de entre el conjunto que constituye el repertorio.

Supóngase que el repertorio del telégrafo posee igual probabilidad, esto es, que la raya y el punto pueden ocurrir igualmente, entonces el telegrafista posee dos mensajes a su disposición, $N = 2$, raya y punto.

Evidentemente, un repertorio tan magro es poco útil. Supóngase ahora que se unen dos claves para producir mensajes, así se obtiene un nuevo repertorio:

- 1 raya punto
- 2 punto raya
- 3 raya raya
- 4 punto punto

y por lo tanto, $N = 2 \times 2 = 4$, y adicionando nuevas claves se pueden conseguir nuevas opciones.

Pero manejar el contenido informativo como multiplicaciones puede ser engorroso con grandes números, por lo cual se requiere expresar N como una suma de la información de todas las claves, esto se logra mediante una transformación logarítmica:

$$\text{Log } N = \log 2 + \log 2 = \log 4$$

Ahora el valor informativo es $\log N$ en vez de solo N . Para los científicos que trabajan con sistemas de comunicación resultó de mayor utilidad emplear un logaritmo de base 2 de manera que:

²⁴ Enciclopedia Salvat, Artículo de Cibemética, pág. 495.

$$\log_2 N = \log_2 4 = 2 \text{ bit}$$

donde bit es la abreviatura de "binary unit" o unidad binaria, y es más útil porque permite trabajar incluso con un repertorio mínimo como el del telégrafo, en cuyo caso:

$$\log_2 N = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

4.33

Esto es, 1 bit es la unidad básica de información.

Ahora supóngase que la probabilidad de los mensajes no es idéntica, tal como ocurre con las letras, ya que algunas aparecen con más frecuencia que otras. En este caso no hay mayor complicación, simplemente se incorpora la probabilidad respectiva. Supóngase que en una clave, de cada 10 mensajes, 6 son rayas y 4 son puntos, entonces, la probabilidad de que aparezca una raya es del 60% ó $p(-) = 0.6$, y la del punto es de 40% ó $p(\cdot) = 0.4$, y el contenido informativo de cada elemento será

$$I(-) = -0.6 \log_2 0.6$$

$$I(\cdot) = -0.4 \log_2 0.4,$$

donde I es el contenido informativo, y el signo (-) (menos) se incorpora debido a que el logaritmo de fracciones es negativo. La información del sistema será la contribución de ambos elementos:

$$I = -[(0.6 \log_2 0.6) + (0.4 \log_2 0.4)] = 0.9708 \text{ bits.}$$

Conforme la probabilidad diverge, el contenido informativo de la transmisión decrece, lo cual es lógico, pues conforme uno de los elementos presenta mayor

frecuencia, aporta menos información, "sorprende menos" su aparición, como se observa con la raya en este ejemplo, cuyo valor informativo desciende de 0.5 a 0.4422 bits al aumentar su probabilidad de 0.5 a 0.6. "...un telegrama de felicitación recibido en la noche de bodas apenas aporta información alguna."²⁵

Ahora supóngase que el emisor de información es un sistema termodinámico que "informa" al fisicoquímico que lo observa a través de la medición de sus parámetros, mediante una sucesión de microestados (los mensajes), sobre el macroestado (o estado macroscópico) de sí mismo.

Entonces el repertorio de "mensajes" consiste de cierto número de microestados de idéntica probabilidad del sistema, de modo que $N = \Omega$, y por tanto

$$I = -\log_2 \Omega. \quad 4.34$$

Lo cual lleva a la conclusión de que la información es justamente el negativo de la entropía,

$$S = -I. \quad 4.35$$

"El concepto de entropía en el cálculo de probabilidades tiene aplicación tanto a la esfera de la teoría de las comunicaciones (como medida de la insuficiencia de información en los datos sobre el objeto) como al campo de la termodinámica estadística (como medida de la dispersión de energía)."²⁶

La entropía es la expresión matemática de la disposición de elementos en un sistema dado, de la secuenciación determinada de esos elementos. La entropía es el negativo de la organización de un sistema dado.

²⁵ J. Singh, *Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética*, 2ª, Madrid, España, 1976, pág. 27.

²⁶ A. V. Jramoi, *Introducción e historia de la cibernética*, México D. F., 1975, pág. 43.

Es precisamente este concepto de entropía-organización el que permite completar el concepto de sistema termodinámico que se comenzó a elaborar al definir el sistema termostático, que es el sistema termodinámico más sencillo.

La base sobre la cual se eligieron las características del sistema termostático no fue arbitraria, sino objetiva, se requirieron tales propiedades para hacer de un objeto determinado, un objeto de estudio de la ciencia termodinámica en su rama termostática. Esto es, para poder obtener información de un objeto es necesario acotarlo de tal manera que resulte posible representarlo mediante un concepto, o sea, describirlo, definirlo y manipularlo, en pocas palabras, hacerlo distinguible de lo que lo rodea. Para distinguirlo en el espacio se requirió especificar su extensión: volumen, área, longitud, para distinguir sus partes componentes, se especificó su composición, etc. Se requiere, en suma, imponer especificaciones al objeto, *restricciones*. "Una vez que hemos definido nosotros, el observador, el sistema que queremos estudiar, hemos consciente o inconscientemente determinado el número de restricciones a que está sometido el sistema y cada una está caracterizada por el valor numérico asignado a un atributo mensurable. El número de restricciones determina el número de grados de libertad y, automáticamente, el número de variables independientes necesarias para describir los estados del sistema en esas condiciones."²⁷ Estas restricciones pueden además, removerse o incorporarse a un sistema dado. El acto de remover o incorporar restricciones es lo que se ha denominado proceso. Por ejemplo: sea un sistema compuesto por dos recipientes separados por un pistón, que contiene un gas confinado en uno de ellos (A)

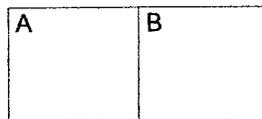


Fig. 4.3 Sistema conformado por dos recipientes con gas.

²⁷ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 65.

y (B) es el recipiente vacío. Suponiendo que el pistón interno se mantiene rígido e inmóvil, se dice que es *restrictivo* respecto al volumen que ejerce el gas en (A). Si se le retira o se le permite moverse, se dice que se ha retirado una restricción del sistema, de modo que se *induce* un proceso generando trabajo útil (debe ocurrir de esta manera pues se requeriría invertir trabajo para comprimir nuevamente el gas) y el gas se expande.

Al incrementar su volumen, el gas incrementa su entropía, como indica la ecuación fundamental, ΔS es positiva y por lo tanto aumenta el número de microestados. La entropía consiste pues, en una medida del *grado de restricción* del sistema, una pérdida de restricciones implica un aumento de la entropía y viceversa.

Probabilidad de microestados y grado de restricción son el aspecto microscópico y macroscópico, respectivamente, de una misma cosa: la organización del sistema, la entropía en tanto que medida del grado de restricción es un necesidad del concepto de sistema, "es una medida del grado de desorganización, entendida esta como la carencia de restricciones"²⁸, carencia que se corresponde con un aumento en el número de microestados.

Queda claro que el sistema es una determinada "estructura de restricciones" cuya expresión matemática está dada por la propiedad extensiva entropía. Y es una estructura que se "mueve" en forma característica. ¿Cómo es dicho movimiento?

4.3-Movimiento cíclico y progresivo / regresivo.

Existan dos grandes clases de movimiento: el movimiento cíclico relativamente estable y el movimiento progresivo / regresivo.

²⁸L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 75.

El movimiento cíclico relativamente estable es todo aquel que *no* modifica la organización de un sistema determinado, por ejemplo, si un sistema conformado por un recipiente aislado lleno de un líquido o gas no reaccionante en las condiciones dadas, se mantiene en un estado, aunque el sistema se mantenga intacto, nunca cesan los movimientos de las partículas que lo componen, ya que estos movimientos se corresponden con un determinado conjunto de restricciones.

El movimiento progresivo / regresivo, es precisamente el cambio del grado y tipo de organización del sistema, la incorporación o supresión de formas de movimiento en un sistema previamente determinado. Se manifiesta como un aumento o decremento de la organización del sistema o conjunto de sistemas. Su vertiente ascendente o progresiva es el movimiento progresivo y su recíproco es la vertiente regresiva o degradativa: el movimiento regresivo. El incremento de los nexos entre los sistemas, la formación de canales de comunicación, el intercambio de información, aumentan la organización, hacen que el sistema sea más *complejo*, que se transforme en algo nuevo. En primera instancia tal aumento en la organización puede asociarse a la disminución de la entropía, en principio esto es cierto, pero hay otras cuestiones a considerar.

El aumento de la complejidad puede identificarse con el surgimiento de nuevos fenómenos, considérese en primer lugar un sistema que consiste en una pequeña máquina electrónica que muestra una letra a la vez en una pantalla y a continuación la imprime en una tira de papel mediante una impresora, supóngase que en un principio, la máquina puede asumir cualquiera de sus 28 microestados con igual probabilidad, o sea que puede mostrar cualquiera de las letras del alfabeto castellano mas el espacio en blanco con igual probabilidad, el repertorio del sistema es a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, ñ, o, p, q, r, s, t, u, v, w, x, y, z, _.

Con tal repertorio lo transmitido al usuario carecerá de significado ya que cualquier letra seguirá a otra con igual probabilidad. El contenido informativo de cada elemento de este repertorio es de

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{28} \right) = 4.8074 \text{ bits por cada signo.}$$

Si ahora se hace que algunas letras ocurran con una probabilidad diferente, por ejemplo, que la "a" ocurra con una probabilidad de 0.07, la "k" con una probabilidad de 0.01 y la "q" con una probabilidad de 0.02, entonces hay que sustituir estos valores en la expresión,

$$I = -\sum p_i \log_2 p_i \quad 4.36$$

y el resultado es:

$$I = 25(0.036 \log_2 0.036) + 0.07 \log_2 0.07 + 0.01 \log_2 0.01 + 0.02 \log_2 0.02 = 4.7642 \text{ bits por cada mensaje.}$$

El contenido informativo de cada mensaje decrece en 0.0432 bits, ya que al repetirse ciertos eventos del repertorio, su imprevisibilidad decrece. El sistema produce menos información conforme queda más restringido, cuando, por el contrario, todas las letras tienen una misma probabilidad, cada microestado sucede a otro sin un orden particular, la libertad de elegir cualquier mensaje es completa, sin restricciones, de otro modo, si se hace, que, por ejemplo, un h nunca suceda a una k, o bien que la w se presente con muy baja probabilidad, como ocurre en el alfabeto castellano, se están introduciendo restricciones al sistema, su estado se encuentra más organizado y refleja menos información.

Pero esto no constituye un lenguaje, para ello el ser humano organizó grupos de letras de acuerdo a determinadas restricciones para así poder asignarles significados convencionales, se dio origen a las palabras, un fenómeno nuevo, surgido a partir de un sistema convencional de signos y /o sonidos, cuyo contenido informativo no se reduce al del repertorio de las letras sino que surge

sobre su base y posee su propia ley de organización, las palabras constituyen un nuevo repertorio de elementos con su propio contenido informativo

Supóngase ahora que nuestra máquina de signos va mostrando las palabras letra a letra e imprimiéndolas en el papel, el contenido informativo de las palabras se puede determinar con una expresión análoga a la que se usó con las letras, el repertorio de microestados ahora son todas y cada una de las palabras, claro que en algunos idiomas ciertas letras constituyen palabras, como la "a" y la "y" en el castellano y cuentan como palabras en vista de que se les ha asignado un significado convencional.

Se tiene ahora la base del lenguaje, las palabras pueden reflejar objetos del mundo exterior, pero esto no es suficiente, los humanos no podríamos hacernos entender simplemente diciendo palabras al azar, con la misma probabilidad, o incluso con probabilidades diferentes, las palabras necesitan ser organizadas en forma coherente, disminuir su libertad mediante restricciones, disminuir su entropía *en un sentido determinado*, con arreglo a un fin. Necesitan ser organizadas con base en un proceso de dirección. El primer paso es organizarlas en frases o enunciados, donde las palabras se *ensamblan* de tal manera que aunque su contenido informativo es el de un repertorio formado por todas las frases u oraciones posibles, que igualmente pueden generarse en la máquina de letras, es también ya el reflejo de un cierto orden de ideas que se organizan al interior del cerebro de quien las emite, si se trata de un ser humano, sea por medio de signos escritos o sonidos, se forma un lenguaje. Este fenómeno es aun más patente cuando se organizan las frases para obtener textos completos, naturalmente, una frase o un texto muy frecuentes aportan poca información pero la circunstancia histórica, el contexto en que se emite dicha información tiene importancia en lo que respecta a su contenido informativo. Y si los textos se organizan para formar lo que se denominan "obras", libros de ciencia, arte, literatura, prensa, etc., el contenido informativo, sin desprenderse nunca de su carácter indicativo de imprevisibilidad, también reviste, ahora, gran importancia el

contexto de su ocurrencia. Por ejemplo, en el caso de las frases, la exclamación ¡cuidado! puede tener bajo contenido informativo "métrico", pero en el contexto de un riesgo a la integridad de quien lo recibe puede resultar de gran contenido informativo "semántico". O bien, una obra "trillada" puede, en ciertas circunstancias, hacer que un lector recapacite sobre determinados conceptos, puede inducir a sus lectores a reflexionar y asociar ideas en forma "novedosa".

Una determinada forma de organización puede conducir a, ser el camino de, transformaciones de un fenómeno en algo nuevo y *no sólo la simple acumulación de información en un sentido cualquiera.*

Considérese ahora otro sistema cuyo repertorio consiste en protones, electrones y neutrones, partículas denominadas subatómicas. Estos objetos pueden conformar unidades discretas cuando neutralizan mutuamente sus cargas, ya que los protones tienen carga positiva, los electrones negativa y los neutrones son eléctricamente neutros. Protones y neutrones se aglomeran en un objeto denominado núcleo atómico, como este posee carga neta positiva, un número de electrones igual al de protones se organiza en forma de *orbitales* en torno al núcleo según su nivel de energía. El resultado es un átomo, un sistema eléctricamente neutro, resultado de la organización de un determinado número de protones y neutrones en la región denominada núcleo y de los electrones en los orbitales, el aumento en el número de protones da lugar a nuevos tipos de átomos, que son los componentes más básicos de los *elementos químicos*, las sustancias más puras que se pueden encontrar en el nivel macroscópico sin degradar los átomos.

La razón de que sea el número de protones y no la suma de protones y neutrones la que define la identidad de un átomo es que el número de protones está en concordancia con el de electrones, y son los electrones los que determinan el comportamiento químico de los elementos, comportamiento que no

varía sensiblemente cuando se modifica la masa del núcleo al incorporar o retirar neutrones.

La organización de nuestro repertorio de tres partículas subatómicas ha generado un nuevo repertorio de unos 106 o más elementos químicos con sus respectivos isótopos naturales y artificiales.

Los átomos a su vez se organizan uniéndose unos con otros mediante interacciones químicas o enlaces químicos, uniones de carácter eléctrico que enlazan a unos átomos con otros cuando dos electrones quedan bajo la influencia simultánea de dos núcleos atómicos. La nueva unidad formada se denomina *molécula*, su número es muy grande y constituyen un nuevo repertorio sobre la base del anterior de átomos. Las moléculas pueden ser la unión de dos átomos en principio, incluso de dos átomos del mismo elemento, como es el caso del H_2 , pero también son muy comunes otras uniones con cantidades variadas y no simétricas de átomos, como es el caso de la unión de un átomo de azufre con tres de oxígeno para formar SO_3 .

Los átomos formados en el interior de las estrellas formaron moléculas que se acumularon en nubes de gas y polvo, con el paso del tiempo, estos materiales dieron origen a los diversos cuerpos celestes: planetas, satélites naturales, cuásares, asteroides, cometas, etc., se desarrolló una potencialidad de esta forma de materia que siguió una ruta de progresión propia, la formación de galaxias y grupos de galaxias; gigantescos conjuntos de estos objetos.

Por otro lado, de entre los diferentes elementos, fue el carbono el que desarrolló quizá la potencialidad más singular, es un elemento cuyos átomos pueden unirse unos con otros formando largas cadenas y anillos que pueden contener otros elementos como hidrógeno, oxígeno, cloro, azufre, fósforo, nitrógeno y otros, es decir, el carbono es capaz de formar familias de compuestos

(sustancias formadas por moléculas), repertorios de moléculas cuyas propiedades no tienen paralelo con las de otros elementos, salvo quizá el silicio.

En las condiciones concretas del planeta Tierra hace miles de millones de años, algunas de estas moléculas comenzaron a organizarse en una unidad superior, con el paso del tiempo formaron un organismo capaz de auto-sostenerse, almacenar información que percibía del medio y que era capaz de auto-replicarse, este organismo desarrolló cualidades revolucionarias, sin parangón en la naturaleza, era la célula, y su adaptación al medio generó nuevas clases de células que comenzaron a su vez a asociarse para sobrevivir ante el embate del medio ambiente, comenzaron a depender unas de otras en mutuo beneficio, el resultado, organismos que tenían a la célula por unidad básica: las primitivas plantas y animales, que a través de un proceso de selección de los más aptos generaron nuevas especies, más aptas para sobrevivir y que cada vez se extendían más sobre la tierra y el mar y que dependían unos de otros y del medio para existir. Sobrevivían en el marco de una determinada asociación, así como lo hacían las células en su interior. Mientras las plantas generan oxígeno necesario para los procesos de oxidación de todos los seres vivos y fijan la energía de la luz solar en forma de energía química, o sea, energía fijada en enlaces químicos de alta energía, los animales, que no realizan este proceso de fijación (la *fotosíntesis*) y que por ser seres autónomos requieren grandes cantidades de energía, la obtienen de las plantas, que se las proporcionan a cambio de dióxido de carbono y productos nitrogenados que los animales desechan y las plantas necesitan. Existe pues, una interdependencia, los diferentes organismos actúan, a gran escala como un gigantesco organismo enlazado por cadenas alimenticias en las cuales se intercambian energía y sustancias químicas.

Los animales, un hito en el desarrollo de la materia, trajeron su autonomía, la necesidad de enfocar su movimiento en actividades útiles para obtener su sustento y reproducción, en la progresión de un sistema de dirección centralizado, el sistema nervioso y de entre las numerosas variantes de este

órgano fue, como ya se vio anteriormente, el sistema nervioso central homínido y particularmente el del homo sapiens el que alcanzó las cotas más altas en cuanto a nivel de organización, al desarrollar, mediante su actividad productiva las modernas capacidades humanas de razonamiento abstracto.

Y tras el ser humano, llegó la sociedad, que a su vez se manifiesta en diferentes formas, según el lugar y la época de que se trate, desde la antigua sociedad primitiva, hasta las modernas sociedades capitalistas y socialistas.

El punto nodal reside en el hecho de que cada nuevo fenómeno obedece a su propia ley de organización. La organización de los elementos de un repertorio dado originan nuevos sistemas, nuevos repertorios de elementos, nuevas contradicciones. La transición de un repertorio a otro constituye el movimiento progresivo / regresivo, que constituye a su vez la base para el desenvolvimiento de determinadas formas de movimiento cíclicas, no se reduce al decremento simple de la entropía, sino a un tipo de decremento específico en cada caso, la explotación de una determinada potencialidad de lo existente, de esta manera, por ejemplo, el ser humano ha explotado las potencialidades de determinados materiales como el silicio, el mismo carbono, los metales y un largo etcétera para construir sus sistemas cibernéticos artificiales, orientando determinados componentes en determinada forma ha logrado construir sistemas de control, computadoras, sistemas de comunicación entre un vasto desarrollo tecnológico en diversas áreas.

Hasta este momento se han estudiado los sistemas en equilibrio, que solamente sufren procesos reversibles, ahora es necesario analizar aquellos sistemas en los que tienen lugar procesos irreversibles, ya que es precisamente en estos sistemas donde se manifiestan propiedades de la entropía, en tanto negativo de la información, de grandes consecuencias para el concepto de sistema y por ende para la teoría y la metodología del conocimiento científico.

4.4.-Irreversibilidad.

¿Determina la concepción del movimiento de la materia y por tanto la concepción misma del sistema un destino ineludible para cada sistema concreto de la naturaleza o, por el contrario, una multiplicidad de posibilidades? El estudio de la desigualdad de Clausius aporta importantes evidencias al respecto.

4.4.1-La desigualdad de Clausius

El estudio de las máquinas térmicas demostró que para cualquier ciclo reversible y no solamente para uno de Carnot:

$$\oint dS = 0$$

4.37

Los trabajos de Carnot, asimismo demostraron que la eficiencia de una máquina térmica depende exclusivamente de la diferencia de temperaturas entre la que opera y no de la sustancia operante, y por lo tanto, dS es independiente de la sustancia operante y para todo ciclo reversible es igual a cero.

Ahora conviene analizar qué ocurre en cada parte del ciclo reversible.

Considérese que el sistema se compone de una "sustancia operante" que bien puede ser un gas, un sólido o un líquido. En el caso del gas, este se encuentra confinado en un recipiente cilíndrico de dimensiones establecidas, en el caso de líquidos y sólidos, su frontera puede ser simplemente su propio contorno, sin necesidad de un dispositivo cerrado, pues su volumen no se modifica sensiblemente ya que sus coeficientes de expansión térmica son muy pequeños y se supondrá que su superficie no se ve afectada bajo circunstancia alguna. En cualquier caso, se dice que el sistema se encuentra restringido espacialmente, de manera que la frontera del sistema es rígida e impermeable, pero supóngase que permite el paso de calor, que es diatérmica. Asimismo, la sustancia es

homogénea y se encuentra en cantidad invariable, por lo cual el sistema también posee una composición restringida.

Ahora el dispositivo (A) se pone en contacto con un segundo objeto (B) que posee mayor temperatura. Como la frontera de (A) es diatérmica, fluirá calor a través de ella desde el segundo cuerpo (que se considera parte del entorno y que puede ser de hecho el entorno mismo). El proceso es reversible y la cantidad de energía intercambiada es de magnitud tal que se evita que la restricción espacial se modifique ostensiblemente o tenga lugar una transición de fase. De este modo el volumen se mantiene constante y la entropía del sistema, se modificará merced a un aumento en la distribución energética de sus partículas, de modo que, para un gas:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad y \quad 4.38$$

$$\Delta S = zk \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N \quad 4.39$$

Y si se trata de un sólido o un líquido, de modo que se pueda considerar que el proceso tiene lugar a presión constante, entonces,

$$dS = \frac{dH}{T} \quad 4.40$$

Donde dH es la diferencial de la entalpía, H, cuando $H = U + pV$.

Integrando esta ecuación se obtiene

$$\int dS = \int \frac{dH}{T} = nC_p \int \frac{dT}{T} = nC_p \ln \left[\frac{T_2}{T_1} \right] \quad 4.41$$

Como $n = N/N_A$ y $C_p = z'R$

$$\Delta S = \frac{\left[NC_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{N_A} = \frac{\left[z'RN \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{N_A} = z'k \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N \quad 4.42$$

Ya que sólidos y líquidos se expanden sólo ligeramente al elevar su temperatura, $C_p \approx C_v$, y por tanto, $z \approx z'$, y de este modo, tanto para sólidos como para líquidos y gases en estas condiciones, la expresión de la entropía es

$$\Delta S_A = zk \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N = \frac{Q_{rev}}{T} \quad 4.43$$

Recíprocamente, el entorno pierde una cantidad de entropía igual a Q_{rev}/T por el calor transferido a (A), y el cambio de entropía total del universo termodinámico es

$$\Delta S_U = \Delta S_A + \Delta S_e = 0, \quad 4.44$$

Donde ΔS_U es el cambio de entropía del universo termodinámico, ΔS_A el cambio de entropía del sistema A y ΔS_e el cambio de entropía del entorno.

O bien,

$$\Delta S_U = zk \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^N + \frac{Q_{rev}}{T} = 0 \quad 4.45$$

Esto es, la entropía del universo termodinámico se mantiene constante, se conserva.

Y si el sistema efectúa un proceso cíclico:

$$\Delta S_{\text{sist}} = \Delta S_A + \Delta S_A' = 0 \quad 4.46$$

Donde ΔS_{sist} es el cambio de entropía del sistema en un cambio cíclico, que, como se observa, se mantiene constante; en los alrededores tiene lugar una situación equivalente,

$$\Delta S_{\text{ent}} = \Delta S_e + \Delta S_e' = 0, \quad 4.47$$

Donde ΔS_{ent} es el cambio de entropía en el entorno tras un proceso cíclico. Ambos resultados son coherentes con el hecho de que la entropía es una propiedad de estado.

De lo que resulta evidente que aumentar o disminuir el grado de restricción al interior de un sistema al ocurrir un proceso reversible redundará en una disminución o aumento recíproco del grado de restricción de los alrededores siempre que las fronteras permitan el paso de energía.

Cuando la eficiencia de una máquina térmica es inferior a la de la máquina de Carnot, se dice que dicho ingenio no está aprovechando completamente la energía liberada al retirar una restricción. Para cualquier máquina que trabaja con una eficiencia menor a la de Carnot:

$$\oint dS > 0 \quad 4.48$$

El origen de este resultado es el alejamiento de la reversibilidad por los procesos, al realizarlos en tiempos finitos están ocurriendo fenómenos no

considerados en las especificaciones del sistema reversible que están menguando la eficiencia del ingenio térmico, fenómenos que intervienen en la trayectoria concreta del proceso, que implican un alejamiento del comportamiento ideal y su sustitución por un comportamiento concreto, esto implica que

$$\Delta S > \frac{-Q_{rev}}{T}, \text{ o bien} \quad 4.49$$

$$dS > \frac{dQ_{rev}}{T}, \quad 4.50$$

para un proceso cíclico.

Para cualquier proceso en un sistema cerrado pero no aislado y no solo para uno cíclico, este alejamiento de la linealidad se manifiesta en un aumento neto de la entropía del universo termodinámico, aumente o disminuya la entropía del sistema:

$$\Delta S_U = \Delta S_A + \Delta S_e > 0. \quad 4.51$$

De todo lo anterior se puede resumir que retirando las condiciones de reversibilidad, es decir, concretizando el sistema termostático, al realizar un proceso en un sistema cerrado pero no aislado, la entropía resultante es positiva, ya que

$$dS_{sist} > \frac{dQ_{rev}}{T} \quad 4.52$$

y como el entorno solamente compensa la entropía debida al intercambio de calor

$$dS_{ent} = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad 4.53$$

entonces

$$dS_U = dS_{\text{sist}} + dS_{\text{ent}} > 0, \quad 4.54$$

operando en ciclos irreversibles de cualquier tipo.

En lo que respecta al universo termodinámico, por lo que concierne al sistema aislado, la entropía del mismo sistema es positiva

$$dS_{\text{sist}} > 0. \quad 4.55$$

Operando en ciclos de cualquier tipo, reversibles o irreversibles:

$$dS_U = dS_{\text{sist}} + dS_{\text{ent}} \geq 0, \quad 4.56$$

para un proceso en un sistema cerrado, y

$$dS_{\text{sist}} \geq \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} \quad 4.57$$

para un sistema cerrado al efectuar un proceso, además, para un sistema aislado:

$$dS_{\text{sist}} \geq 0, \quad 4.58$$

o lo que es igual,

$$dS_U \geq 0 \quad 4.59$$

donde los signos (=) corresponden al ciclo reversible y los signos (>) a la trayectoria irreversible.

La expresión 4.57 constituye una definición alterna de la segunda ley de la termodinámica y se conocen como la *desigualdad de Clausius*.

Esta expresión permite abordar la cuestión de los *fenómenos concurrentes* que desvían los procesos de la reversibilidad, los cuáles se han mencionado sin mayor explicación.

Despejando la desigualdad de Clausius:

$$dS_{\text{sist}} - \frac{dQ_{\text{rev}}}{T} \geq 0 \quad 4.60$$

Se observa que entre la diferencial de entropía generada por la trayectoria irreversible y el cociente dQ_{rev}/T correspondiente a la trayectoria reversible equivalente hay una diferencia mayor a cero y que sólo cuando el proceso es reversible tal diferencia no existe.

¿De donde proviene esa diferencia?. La respuesta se encuentra en las restricciones que se impusieron al sistema termodinámico para configurarlo como sistema termostático de forma que se pudiese estudiar el movimiento térmico sin interferencias, debe recordarse que para ello se concibió dicho sistema como si los procesos en él se efectuaran de forma *cuasiestática*, esto es, en forma infinitamente lenta, "...para garantizar que en cada estado intermedio el sistema alcance el equilibrio..."²⁹, y además el proceso es isotérmico: "Por estas razones decimos que el proceso isotérmico es también ideal."³⁰ Ahora retírense estas restricciones, si el proceso no es infinitamente lento perderá el equilibrio en el transcurso del proceso antes de alcanzar el estado final, se tomará "caótico", tendrán lugar flujos de materia y de energía que provocarán efectos de fricción a través del mismo, igualmente la generación o consumo de trabajo libre por medio de pistones u otros dispositivos no estará exenta de fricción entre sus componentes y la sustancia operante. Es precisamente la fricción la responsable de la generación de una cantidad de entropía adicional a la del proceso y que depende de la trayectoria del mismo.

²⁹ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 55.

³⁰ *Ibidem*.

Ya en 1850 "... Clausius mismo propuso que esta diferencia fuese igual a un término que el llamó 'el calor no compensado' y que llamó dQ' '. Entonces

$$dS - \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = \frac{dQ'}{T} > 0 \quad 4.61$$

Sin embargo, nunca dio una descripción más precisa del término fuera de asociarlo con una medida del grado de irreversibilidad de un proceso.³¹

Ahora bien, sea un sistema cerrado en contacto térmico con su entorno, la entropía del universo termodinámico así configurado posee dos componentes, la entropía del sistema y la del entorno, el cambio de entropía del sistema al intercambiar calor con el entorno está dado por la ecuación $dS = \delta Q_{\text{rev}} T^{-1}$. "Pero, por otra parte, dentro del sistema pueden generarse fenómenos irreversibles provenientes precisamente de 'la fricción' inherente a los procesos mismos que generan un cambio en la entropía. Este cambio usualmente denominado 'producción de entropía' lo llamamos $(dS)_i$."³² Entonces, la entropía del sistema está dada por la expresión:

$$dS_s = dS_{\text{ext}} + (dS)_i, \quad 4.62$$

Donde

dS_s = cambio de entropía del sistema,

dS_{ext} = cambio de entropía en el entorno, y

$(dS)_i$ = entropía generada por efectos de fricción al interior del sistema.

³¹ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 86.

³² *Ibidem*, pág. 89.

o bien

$$dS_s = \frac{dQ_{rev}}{T} + (dS)_i, \quad 4.63$$

despejando,

$$dS_s - \frac{dQ_{rev}}{T} = (dS)_i > 0, \quad 4.64$$

que equivale a la desigualdad de Clausius, solo que: "El calor no compensado de Clausius es ahora sustituido específicamente por la producción de entropía, asociada a los mecanismos de fricción internos, inherentes al sistema mismo."³³

$(dS)_i$ es una pérdida de organización del sistema debida al flujo caótico concreto resultante de retirar las restricciones que caracterizaban al sistema reversible y representa asimismo la medida en que perdemos conocimiento del sistema durante el proceso debido a ese flujo que no se encuadra en el modelo del proceso reversible. Mientras menos control o dirección se tenga del proceso, mayor será la pérdida de organización del sistema, un proceso cualquiera no puede ser más eficiente que uno reversible, pero sí puede ser mucho menos eficiente.

Resulta asimismo claro que un aumento o disminución de la entropía debida a $Q_{rev}T^{-1}$ en el sistema será compensada por una correspondiente disminución o aumento en la entropía del entorno, resultando, en el caso del proceso irreversible una producción neta de entropía $(dS)_i$ en el universo termodinámico:

$$dS_U = (dS)_i \geq 0 \quad 4.65$$

³³ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 89.

para sistemas aislados, o bien,

$$dS_U = dS_{Sist} + dS_e \geq 0$$

4.66

para sistemas cerrados.

4.4.2.-Sistemas abiertos

Un sistema que intercambia masa y por lo tanto energía recibe el nombre de sistema abierto, algunos ejemplos de sistema abierto pueden ser las disoluciones sobresaturadas, las mezclas de líquidos inmiscibles, etc. Los sistemas abiertos más sencillos son aquellos conformados por dos o más sistemas homogéneos. Un "...sistema homogéneo, o fase como los llamó Gibbs, está constituido por una o varias sustancias constituyentes cuyas propiedades termostáticas, presión, temperatura, densidad, etc., son las mismas en cada uno y todos los puntos del sistema, de ahí la calificación de homogeneidad"³⁴ Un material homogéneo o fase no necesariamente es una sustancia químicamente pura, puede ser una mezcla de dos sustancias que se encuentran en el mismo estado de agregación, las disoluciones sobresaturadas sólido-líquido, por ejemplo, constan al menos de dos fases, una líquida y una sólida, el material líquido puede ser agua y el sólido bien puede ser una sal iónica que al ser soluble en agua se encuentra lo mismo en la fase sólida que en la líquida de modo que la fase líquida es una mezcla de dos componentes: agua y sal iónica disuelta, mientras que la fase sólida es una sustancia pura: la sal iónica sin disolver. Si se confina el sistema así formado dejando un espacio vacío, a cierta temperatura se formará una tercera fase, constituida por el líquido evaporado que de esta manera se encontrará en dos fases, la líquida y la gaseosa. Pero no puede afirmarse que en estas disoluciones las fases permanecen separadas unas de otras, intercambian energía y masa en todo momento, el líquido se evapora y condensa al mismo tiempo y lo propio hace el soluto sólido, se disuelve y concentra a un mismo

³⁴ Ibidem, págs. 77-78.

tiempo. Cuando este intercambio se realiza con la misma velocidad, se dice que el sistema se encuentra en equilibrio, cuando tiene lugar un proceso en el sistema, las velocidades son diferentes, por ejemplo, si ingresa energía calorífica al sistema conformado por todas las fases, la velocidad de disolución del sólido es mayor que la de concentración y la velocidad de evaporación del líquido aumenta con respecto a su velocidad de condensación, de lo que resulta que la concentración del soluto aumenta en el líquido y también aumenta la cantidad de vapor en la fase gaseosa.

En estas condiciones no hay manera de conocer la naturaleza de los cambios de entropía en cada fase desde el punto de vista de la termostática. Un camino para ello puede ser suponer que su magnitud se corresponde con la de cada fase por separado, y que simplemente se suman en el sistema completo, naturalmente, esto deja fuera las interfases, la región donde ocurre el intercambio de materia y energía entre las fases y que no forma parte de una o de otra. Suponiendo que las interfases no impliquen modificaciones sustanciales de la entropía, el razonamiento será válido, pero eso dependerá de cada sistema y de cada proceso, la materia que intercambian las fases "...a su vez puede ser portadora de una cierta cantidad de entropía que cada fase, concebida como un sistema abierto, debe al contacto con su entorno tiene una expresión más compleja que $dS = Q_{rev} / T$.

Una forma sencilla de estudiar los sistemas abiertos, que ha implementado la termodinámica es tomar todas las fases involucradas en una transformación como un sistema único que se considera a su vez un sistema cerrado, de modo que se pueda estudiar desde el exterior, entonces el cambio de entropía del universo (dS_U) es igual al cambio de entropía del sistema (dS_{Sist}) más el cambio de entropía de los alrededores (dS_e):

$$dS_U = dS_{Sist} + dS_e \qquad 4.67$$

Si el proceso es reversible

$$dS_U = 0 \quad 4.68$$

y el cambio de entropía en el entorno es:

$$dS_e = -\frac{Q_{rev}}{T} \quad 4.69$$

recíprocamente, el cambio de entropía en el sistema es

$$dS_{sist} = \frac{Q_{rev}}{T} \quad 4.70$$

esta última magnitud es una contribución de cada fase. Supóngase que se trata de una disolución sobresaturada con tres fases: sólida, líquida y gaseosa, entonces,

$$dS_{sist} = dS_{(gas)} + dS_{(liq)} + dS_{(sol)} \quad 4.71$$

Pero ya no puede determinarse que magnitud del cambio total corresponde a cada fase, sólo que juntas contribuyen a la entropía total del sistema. En el caso de un proceso irreversible:

$$dS_{sist} = dS_{(gas)} + dS_{(liq)} + dS_{(sol)} = \frac{dQ_{rev}}{T} + (dS)_i \quad 4.72$$

de manera que:

$$dS_U = dS_{sist} + dS_e > 0. \quad 4.73$$

4.5.-La flecha del tiempo.

La desigualdad de Clausius ha provocado una controversia en torno a si la entropía constituye un parámetro que indique la dirección de los procesos naturales, es decir, se interpreta esta ecuación indicando que todo proceso tiende a incrementar la entropía del universo, pues los procesos que tienen lugar en la naturaleza son de tipo irreversible, se trate o no de procesos cíclicos se obtiene siempre un excedente de entropía igual a $(dS)_i$. Por ejemplo, en G. W. Castellan leemos : ... todos los cambios reales tienen una dirección que consideramos natural. La transformación en el sentido opuesto no sería natural; sería irreal. En la naturaleza, los ríos corren de las montañas hacia el mar, nunca en el sentido opuesto. Un árbol florece, da frutos y luego cambia sus hojas. Pensar en las hojas secas levantándose, uniéndose por sí mismas al árbol y después convirtiéndose en brotes, resulta grotesco. Una barra metálica aislada, inicialmente caliente en un extremo y fría en el otro, alcanza una temperatura uniforme; tal barra metálica, a una temperatura inicial uniforme, nunca pasará a un estado en el que uno de sus extremos esté caliente y el otro frío en forma espontánea.³⁵ Y más adelante : "Sería útil que un sistema tuviera una o más propiedades que cambiaran siempre en una dirección cuando el sistema experimentara una transformación natural, y cambiara en la opuesta si imaginamos que el sistema experimenta una 'transformación no natural'. Afortunadamente, existe un sistema con tal propiedad, la entropía, así como con otras que se desprenden de ésta..."³⁶

Y esta dirección de los procesos naturales se asocia con la dirección misma del tiempo, como una "flecha del tiempo termodinámica", tal como indica Stephen W. Hawking: "La explicación que se da usualmente de por qué no vemos vasos rotos recomponiéndose ellos solos en el suelo y saltando hacia atrás sobre la mesa, es que lo prohíbe la segunda ley de la termodinámica. Esta ley dice que en

³⁵ G. W. Castellan, *Fisicoquímica*, 2ª, Wilmington, E.U.A., 1987, pág. 161.

³⁶ *Ibidem*.

cualquier sistema cerrado el desorden, o la entropía, siempre aumenta con el tiempo." ... "El que con el tiempo aumente el desorden o la entropía es un ejemplo de lo que se llama una flecha del tiempo, algo que distingue el pasado del futuro dando una dirección al tiempo."³⁷

L. García-Colín hace esta referencia de tales interpretaciones: "...suele asociarse a la desigualdad..." de Clausius, "una dirección en el tiempo a los procesos reales (¡no reversibles!)."³⁸

Sin embargo, tales expectativas se encuentran, por decir lo menos, con serios obstáculos.

En lo que respecta al aumento de la entropía como parámetro que indica la posibilidad de que se efectúe determinado proceso, se ha afirmado que todo proceso "real" es aquel que incrementa la entropía del universo. Pero la *idealidad* de los procesos reversibles, en tanto modelos físicos, no radica en su alejamiento de la realidad fáctica, ya que constituyen un reflejo simplificado de fenómenos reales, concebidos en ausencia de otros procesos y que por tanto, se desenvuelven de acuerdo a leyes relativamente sencillas de carácter muy general. En el caso del movimiento térmico, este se concibe como carente de efectos adicionales ocasionados por la fricción que lo complican en los sistemas concretos, esto hace que el sistema térmico que opera entre dos temperaturas de manera reversible (v. g. la máquina de Carnot) puede regresar a un estado anterior sin que resulte afectado algún parámetro del entorno. Analizando de cerca el sistema reversible se observa que este ingenio no transita arbitrariamente de un estado a otro, cuando pierde una restricción y libera trabajo útil, aumenta su entropía, para devolverlo a su estado anterior *requiere forzosamente* una inversión de trabajo útil que lo restrinja nuevamente.

³⁷ S. W. Hawking, *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*, México D. F., 1994, pág. 196.

³⁸ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 54.

El sistema reversible, al igual que el irreversible, no modifica su estado sin arreglo a causalidad alguna. Puede afirmarse que los vasos rotos *sí* pueden recomponerse y levantarse hacia la mesa de donde cayeron..., claro que para eso requieren también *forzosamente* trabajo útil acoplado de otros sistemas, trabajo que se invertirá en soldarlos y darles forma de nuevo y luego más trabajo para levantarlos y colocarlos en la mesa, todo esto ocurre en forma tan "espontánea" y "real" como su caída y ruptura en pedazos. Más que hablar de procesos "espontáneos" y "reales" o "no espontáneos" e "ideales", conviene ahora hablar de procesos que almacenan energía útil y de procesos que liberan energía útil, es decir, energía que puede aprovecharse completamente para generar trabajo útil. Estos últimos también se denominan "favorables termodinámicamente" por cuanto al retirar en un sistema una restricción se "induce" un proceso que libera energía útil.

En la primera clase de procesos disminuye la entropía del sistema, en la segunda clase la entropía aumenta. Ambos requieren algún tipo de acoplamiento. Los procesos que almacenan energía requieren acoplarse con otros sistemas que les proporcionen trabajo para disminuir su entropía, aumentar su grado de restricción y almacenar energía libre, los procesos que liberan energía requieren un acoplamiento para retirar las restricciones e inducir el proceso de que se trate y para "desfogar" trabajo si se trata de sistemas cerrados, misma que no es necesaria en los sistemas aislados.

De lo anterior se sigue que "idealidad" no riñe con "realidad", de ahí que estos términos antitéticos que llaman a confusión han sido sustituidos en la terminología moderna por reversibilidad e irreversibilidad .

Un proceso netamente *antinatural* sería que una máquina de Carnot, los vasos rotos o cualquier otro sistema cerrado durante un proceso reversible o irreversible redujeran su entropía sin el concurso de trabajo libre.

Estos sucesos contravienen la segunda ley de la termodinámica, que en su formulación como la desigualdad de Clausius indica que la entropía del universo no puede disminuir en un proceso irreversible, lo que parece olvidarse es que dicha ley también indica que la entropía total puede conservarse, como ocurre en los procesos reversibles, tanto el aumento de la entropía como su conservación están contemplados y autorizados por la segunda ley.

¿En qué consiste la diferencia entre procesos reversibles e irreversibles? Precisamente en que en los primeros la entropía se conserva y en los segundos se genera una entropía $(dS)_i$ en el universo termodinámico, y esto vale para cualquier clase de procesos aislados o cerrados, independientemente de si la entropía del sistema aumenta o disminuye. Los procesos reversibles son procesos de máxima eficiencia (nunca igual a 100%) que se desarrollan como una sucesión infinita de estados de equilibrio y que no presentan fugas parásitas de energía, es decir, de efectos de fricción. Los procesos irreversibles transcurren en lapsos finitos con la consecuente pérdida del equilibrio, y la presencia de fricción que produce una entropía $(dS)_i$ en estos procesos es justamente lo que hace la diferencia entre procesos reversibles e irreversibles. El universo termodinámico en el caso de un sistema cerrado no recupera su estado tras sufrir, el sistema, un proceso irreversible pues resulta una producción neta de entropía.

Por tanto, la dirección del proceso, como se puede ya advertir, no está dada por el aumento neto de la entropía ni en los sistemas abiertos, ni en los cerrados; pues la desigualdad de Clausius sólo vale estrictamente para sistemas aislados y no para los sistemas cerrados o abiertos, la función que indica si un proceso inducido es "espontáneo" (favorable termodinámicamente) o no, es precisamente la energía libre, si aumenta, se genera una diferencia de potencial con su entorno y el sistema ha almacenado energía; si disminuye, el sistema se equilibra con su entorno al liberar energía útil y el proceso es inducido.

Conviene por ello analizar más de cerca la interacción entre las fases, el equilibrio entre ellas consiste en que intercambian materia (y por tanto energía) a la misma velocidad, de manera que se establece un estado estacionario, la ocurrencia de un proceso tiene lugar cuando la materia fluye con más velocidad en una dirección que en otra, esto es, la materia en una fase posee un estado tal que se ve obligada a liberar materia (y por lo tanto energía) hacia la fase con la que otrora se encontraba en equilibrio, es decir, esta fase posee una densidad de energía libre o útil mayor que la otra, se ha generado una *diferencia de potencial químico* entre ambas fases. Dicho potencial químico es análogo al potencial eléctrico, al potencial mecánico y al potencial térmico, carga, masa y energía térmica generan diferencias de potencial cuando se acumulan en un sistema por la acción de trabajo útil en virtud de que este actúa contra un campo de fuerza propio de cada forma de movimiento y queda almacenado por medio de una restricción o sistema de restricciones, que actúan como un "cerrojo" de la energía libre. Pero cuando dicho cerrojo se abre, el sistema busca equilibrarse con su entorno, haciendo desaparecer la diferencia de potencial y liberando energía libre. La materia, pues, persigue estados ligados de mayor o menor densidad de energía que los precedentes. La necesidad de restablecer el equilibrio mediante el flujo de energía y materia origina un proceso en una dirección determinada: hacer que los potenciales de las sustancias que se intercambian entre las fases adquieran valores equivalentes, que es la condición de equilibrio, "...el resultado de que en equilibrio todos los potenciales químicos de la misma sustancia en cada una de las fases deben ser iguales entre sí es uno de los más grandes logros del trabajo de Gibbs."³⁹

La ecuación que define el *potencial termodinámico* para un mol de sustancia es la expresión que define la energía útil del sistema:

$$TdS - dU + dW = dE_p \qquad 4.74$$

³⁹ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 79.

Donde $dE_p \equiv$ cambio de energía libre.

desarrollando dW para todos los tipos de trabajo:

$$TdS - dU + p_{\text{ext}}dV + dW_a = dE_p \quad 4.75$$

donde dW_a designa cualquier trabajo no p-V.

La ecuación 4.75 puede describirse como:

$$-d(U - p_{\text{ext}}dV - dW_a - TdS) = dE_p \quad 4.76$$

la combinación de variables de la diferencial es entonces:

$$U - p_{\text{ext}}dV - dW_a - TdS \equiv E_p \quad 4.77$$

Para un proceso en equilibrio,

$$dE_p = 0 \quad 4.78$$

Para un proceso no favorable termodinámicamente,

$$-dE_p < 0 \quad \text{ó} \quad dE_p > 0 \quad 4.79$$

Si por el contrario, el proceso es favorable termodinámicamente,

$$-dE_p > 0 \quad \text{ó} \quad dE_p < 0. \quad 4.80$$

Es decir,

$$-d(U - p_{\text{ext}}dV - dW_a - TdS) \leq 0 \quad 4.81$$

Lo cual es formalmente lógico, ya que un proceso "espontáneo" es aquel que disminuye la energía libre y un proceso no favorable termodinámicamente requiere incrementar la misma.

Como se observa en la ecuación 4.81, un aumento de entropía contribuye a la "espontaneidad" de un proceso, como lo indicaron algunos autores. La entropía es una función *extremal*, es decir, que alcanza un valor final máximo tras un proceso, aunque su magnitud neta aumente o disminuya, lo que invalida la afirmación de que su aumento neto constituye un indicador de la dirección que ha de tomar un proceso. Ahora se advierte que la entropía es un componente más de una función más compleja cuya forma depende de cada sistema y de cada proceso, pues "... dependiendo de qué variables (restricciones) mantengamos fijas en el proceso, serán diferentes las funciones que determinen la dirección en que el proceso inducido ocurra."⁴⁰, la ecuación 4.81 toma una forma específica para cada situación concreta.

Por ejemplo, como en un sistema aislado, $dU = 0$, $\delta Q = 0$ y $\delta W = 0$, entonces la ecuación 4.81 se despeja como

$$-TdS \leq -dU + \delta W, \quad 4.82$$

cambiando de signos,

$$TdS \geq dU - \delta W, \quad 4.83$$

como

$$\delta Q_{rev} = dU - \delta W, \quad 4.84$$

⁴⁰ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994, pág. 90.

$$TdS \geq \delta Q_{rev}, \quad 4.85$$

despejando dS , se obtiene

$$dS \geq \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad 4.86$$

que es la desigualdad de Clausius.

Pero como también $\delta Q_{rev} = 0$, la definición del potencial termodinámico toma la forma

$$dS \geq 0 \quad 4.87$$

Aquí se observa claramente en qué condiciones, las del sistema aislado, el aumento neto de la entropía indica la dirección favorable termodinámicamente del proceso.

Corresponde ahora analizar lo que respecta a la entropía como generador de una "flecha del tiempo".

El tiempo, a fin de cuentas sólo es distinguible como una sucesión de eventos que se encadenan unos con otros "... el tiempo caracteriza el orden de sucesión de los estados y las relaciones de causa y efecto, la duración de la existencia de cualquier tipo de objetos y procesos y la conexión interna de los estados que se conservan y de los que varían."⁴¹ Entre sus propiedades principales figura su carácter monodimensional e irreversible.

El principal argumento de la flecha del tiempo es que debe existir un parámetro o varios que se modifiquen incluso cuando el sistema, o el universo

⁴¹ S. Meliujin, M. Omelianovski, L. V. Kutnetsov, *Problemas filosóficos de la física contemporánea*, México D. F., 1969, pág. 53.

físico retornen a su estado inicial tras sufrir un proceso cíclico, el proceso reversible, según esta interpretación, no manifiesta tales parámetros, ya que el sistema y su entorno puede retornar a su punto de partida sin sufrir cambio neto alguno. La entropía evidentemente se modifica en los sistemas aislados y en los universos físicos cuando están conformados por sistemas cerrados que sufren procesos irreversibles, incluso si el sistema retorna a su estado inicial tras un proceso cíclico. Esto implica que un sistema (o universo termodinámico) pasa de un estado de menor probabilidad a uno de mayor probabilidad, es decir, a uno con más microestados.

Pero, en primer lugar cabe recordar que el aumento de la entropía sólo es directriz de los procesos que ocurren en los sistemas aislados, tanto los sistemas abiertos como los cerrados son gobernados por otros potenciales termodinámicos específicos para cada sistema y para cada proceso. En segundo lugar, en los sistemas concretos no siempre son despreciables los efectos producidos por el movimiento electromagnético, carga, magnetización, etc. el movimiento mecánico a gran escala y en los sistemas del universo cosmológico, los efectos gravitatorios son ineludibles. En resumen, los sistemas concretos no siempre podrán reducirse a sistemas termostáticos y, por lo tanto, las leyes de la termostática deben estudiarse en su concreción para poder extenderlas a sistemas más complejos, la desigualdad de Clausius sólo podría ser indicador del paso del tiempo en un sistema aislado y libre de efectos gravitatorios, que solamente desarrolla procesos irreversibles. Sólo considerando al universo cosmológico como un sistema aislado, como en el modelo de S. W. Hawking, podría tener sentido algo como la citada "flecha del tiempo termodinámica", pero también es cierto que a ese nivel los efectos gravitatorios son ineludibles, no pueden ser despreciados.

En tercer lugar, históricamente se ha registrado un aumento de la organización en determinadas regiones del universo que ha redundado en la formación de los cuerpos estelares, organismos vivos, sociedades, etc., proceso que se ha verificado sea porque la entropía puede disminuir en los sistemas

abiertos, o únicamente por el acoplamiento de sistemas, mediante el cual unos sistemas incrementan su grado de restricción, su organización a costa de la pérdida de organización en otros sistemas, pérdida que puede ser de magnitud mayor que la ganada por los otros sistemas. Este método es ampliamente utilizado, por ejemplo, por los seres vivos que utilizan en última instancia energía solar para contrarrestar el incremento de su entropía.

Pero regresando a los sistemas aislados, donde pudiera parecer que la entropía constituye una "flecha del tiempo", tal aseveración queda descartada por otra serie de cuestiones que atañen a la idea que se tiene de la materia misma, entendida esta como realidad objetiva y no solo como masa.

El tiempo, al igual que el movimiento, es una forma de existencia de la materia como totalidad y no sólo de alguno de sus aspectos, posee por ello las cualidades de la continuidad y de la discontinuidad, el tiempo absoluto, general, solo se manifiesta, existe, en el cambio y conservación: de los estados concretos de los fenómenos de la naturaleza, es decir, no existe un tiempo absoluto por separado de sus manifestaciones concretas, particulares, *sino en todas ellas a la vez*. El estado termodinámico caracterizado por los parámetros U , V , S , etc., es uno de esos estados concretos o niveles de organización de la materia, cuyo cambio y conservación constituyen el tiempo, ya que como se recordará, la materia es infinita en profundidad, no existe un nivel de organización último, una flecha del tiempo requeriría un número infinito de términos y especificar la concatenación de ellos para ser determinada. La entropía termodinámica en el sistema aislado no es más que uno de esos términos. "La entropía es una propiedad parcial de la materia, mientras que el tiempo es un atributo universal suyo."⁴² En este orden de ideas, puede afirmarse que el tiempo nunca se detiene o revierte bajo circunstancia alguna, se considere o no en modelo alguno de cualquier nivel estructural de la materia, el tiempo transcurre igualmente en

⁴² S. Meliujin, M. Omelianovski, L. V. Kutnetsov, *Problemas filosóficos de la física contemporánea*, México D. F., 1969, pág. 56.

sistemas concretos abiertos, cerrados o aislados, ocurran procesos reversibles o irreversibles, pues como analiza S. Meliujin: "Podemos recurrir incluso al análisis de un sistema caloríficamente cerrado (Meliujin debe referirse a un sistema aislado). Todas las diferencias de temperatura se eliminarán en él al cabo de cierto tiempo y el sistema pasará a un estado de equilibrio calorífico con una entropía máxima. Pero, sin embargo, no se interrumpirá la interacción de los átomos y moléculas y de su movimiento, y todas las partículas también actuarán recíprocamente con los objetos externos a través de los campos electromagnéticos y gravitatorios..." "Todos estos procesos transcurren en el tiempo. Por consiguiente, no puede considerarse el incremento de la entropía como la causa de la irreversibilidad del tiempo, ya que no es más que un fenómeno concomitante suyo, que se limita a consolidarla en los correspondientes niveles estructurales en todos los sistemas físicos en que la entropía crece realmente."⁴³

No en balde, L. García-Colín se refiere a la desigualdad de Clausius como la expresión "...quizás la más controvertida, mal comprendida y abusada de toda la termostática, y cuya validez dentro de un contexto perfectamente bien definido ha sido incuestionablemente establecida..."⁴⁴ por cuanto se ha buscado fincar en ella expectativas de explicación de la naturaleza que claramente la rebasan.

Valga ahora una larga cita de S. Meliujin para recapitular sobre la relación del aumento de entropía con la dirección del tiempo: "Las causas de la irreversibilidad del tiempo deben tener un carácter tan universal como el propio tiempo, o incluso ser más básicas en el sentido de su generalidad y de su fundamento material. Como tal causa debe considerarse en primer lugar la asimetría o la irreversibilidad de las relaciones de causa y efecto en todos los sistemas. El nexo causal puede establecerse independientemente del transcurso del tiempo, y la índole de su carácter genético es tal que da lugar a que un

⁴³ Ibidem.

⁴⁴ L. García-Colín, *De la máquina de vapor al cero absoluto (calor y entropía)*, México D. F., 1994., pág. 48.

fenómeno origine y condicione otro, de acuerdo con las leyes de conservación de la materia y de sus propiedades fundamentales. El fenómeno que origina algo constituye la causa, y lo creado por él, el efecto. Esto último se convierte a su vez en causa, dando lugar a algo nuevo, y así sucesivamente. Pero en todos los casos, la acción y el proceso de creación están dirigidos únicamente desde las causas a las consecuencias. La influencia y la creación inversas son imposibles, ya que ello implicaría la contradicción de toda una serie de leyes objetivas, entre ellas la del incremento de la entropía. Semejante asimetría e irreversibilidad de la influencia se mantienen también en todos los sistemas con nexos funcionales bilaterales o multilaterales, cuando al principio un fenómeno influye en otros, después estos últimos en el primero, etc. lo cual se produce paralelamente a las modificaciones sucesivas que experimentan.

“Si en cierto sector o durante determinado período todos los nexos causales estuviesen dirigidos en sentido contrario y las acciones se vieses orientadas desde las consecuencias hacia las causas que las originaron, todas las mencionadas consecuencias (diferentes objetos y sus propiedades) deberían modificarse después de tal forma que desapareciesen dentro de los propios fenómenos que las habían originado desde el punto de vista del transcurso del tiempo en el sentido ‘corriente’; a continuación, las últimas desaparecerían a su vez con el transcurso del tiempo dentro de las causas a que debían su origen, etc.” Esto generaría paradojas insolubles del tipo de los vasos rotos y las hojas secas que se recomponen solos. Esto no se corresponde con la experiencia y el estudio de la realidad objetiva, las consecuencias siguen a las causas y no al revés. “Este orden fundamental de sucesión de los acontecimientos determina la irreversibilidad del tiempo en cada sector del espacio.”⁴⁵

En síntesis, el nexo causal comprende y rebasa la irreversibilidad termodinámica, abarca todos los tipos de irreversibilidad a todas las escalas. “En

⁴⁵ S. Meliujin, M. Omelianovski, L. V. Kutnetsov, *Problemas filosóficos de la física contemporánea*, México D. F., 1969, pág. 59.

su conjunto, el desarrollo en el mundo constituye una unidad de cambios cíclicos e irreversibles. Pero la irreversibilidad no puede identificarse con una dirección única o con el movimiento del Universo hacia un fin determinado, semejante a la 'muerte térmica'. Para los sistemas materiales infinitos como lo es todo el Universo no existe un último estado de mayor probabilidad. En ellos son posibles variaciones ilimitadas de la materia en diferentes sentidos." El tiempo, en resumidas cuentas, carece de principio y de final, aún cuando sus manifestaciones parciales sí los posean.

En razón de todo lo anterior, puede afirmarse que el movimiento de los sistemas concretos carece de algo semejante a un "destino ineluctable" y, que, por el contrario, sus posibilidades son inagotables para el conocimiento, son infinitas.

4.6-Niveles de organización de la materia y concepto de sistema.

El estudio del fenómeno de la irreversibilidad permitió ampliar considerablemente los horizontes del estudio del movimiento térmico, junto al esquema *purificado* del sistema termostático, se incorporaron las complicaciones asociadas a los sistemas concretos que manifiestan el movimiento térmico, la irreversibilidad manifestó cierto tipo de influencia mutua entre diferentes procesos, el fenómeno central del calor ahora coexiste con otros fenómenos como el flujo de materia dentro del sistema, mismo que no se consideraba en el análisis termostático. Por otro lado, dicho análisis aún es útil donde dicha influencia se puede abstraer, por ejemplo, al estudiar sistemas abiertos, donde el sistema abierto y su entorno inmediato han de considerarse un sistema cerrado o aislado para obtener alguna idea de lo que ocurre al interior del sistema, de lo contrario se tiene que recurrir a hipótesis adicionales a la segunda ley para estudiar el equilibrio entre fases, o bien estudiar el fenómeno desde el punto de vista de los potenciales termodinámicos.

El resultado es que el ámbito de estudio de la ciencia del calor ha sido ampliado y ya no solamente considera aquellos sistemas que se comportan reversiblemente, sino también aquellos que tienen un carácter más concreto. El sistema termostático pudo entonces considerarse un caso particular de una noción más amplia: el *sistema termodinámico*, aquel que sufre tanto procesos reversibles como irreversibles, que manifiesta fenómenos adicionales al movimiento térmico. La organización de estos sistemas está dada por la ecuación de Boltzmann:

$$S = k \ln \Omega, \quad 4.88$$

que es el negativo de la información,

$$I = -k \ln \Omega, \quad 4.89$$

el cambio en el grado de organización es equivalente al cambio de entropía,

$$\Delta S = k \ln \left(\frac{\Omega_f}{\Omega_i} \right) = \frac{Q}{T} \quad 4.90$$

y cuando el sistema es cerrado y el proceso reversible,

$$\Delta S_{\text{rev}} = k \ln \left(\frac{\Omega_f}{\Omega_i} \right) = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \quad 4.91$$

Cabe recordar que el sistema termostático y el sistema termodinámico visualizados en esta exposición son modelos de objetos-procesos de la realidad objetiva, los objetos-procesos concretos, que existen en el marco de un sinfín de concatenaciones internas y externas y que sólo bajo determinadas condiciones y restricciones pueden reducirse a sistemas termostáticos y termodinámicos. Si, por ejemplo, se incorporan parámetros correspondientes a los movimientos mecánico, electromagnético, etc., de manera que un sistema determinado quede descrito en

tanto que objeto macroscópico, se habla entonces de un sistema físico-macroscópico que incluye al sistema termodinámico como un caso particular. Objetos desde pequeñas cantidades de gas hasta cuerpos celestes son ejemplos de sistemas físico-macroscópicos.

Sobre la base de los sistemas físico-macroscópicos, sobre la organización de ellos, han surgido otra clase de sistemas que también corresponden a la naturaleza macroscópica, se trata de los sistemas cibernéticos o sistemas relativamente aislados, aquellos capaces de transmitir y procesar información, los primeros sistemas de este tipo fueron las células vivas, organismos capaces de *percibir* su entorno, el medio ambiente; reaccionando a los estímulos que constituyen dichas percepciones y así modificando su estado a modo de sustentar y reproducir su estructura y aún aumentar su organización, es decir, las células son capaces de obtener información de su entorno y usarla para dirigir procesos en su interior a fin de sustentar el equilibrio dinámico que les da sustento. De sus alrededores obtiene información y energía que le son útiles a fin de mantener su propia entropía en un nivel "vital" y aún para producir réplicas suyas, nuevas células. Y todo esto sobre la base de interacciones de tipo químico, pero no reducibles a ellas.

La organización de las células a lo largo de millones de años arrojó nuevos organismos cibernéticos: plantas y animales, los animales, como ya se dijo, son organismos autónomos que se sustentan con la energía que las plantas obtienen fijando la luz solar, eso les permitió, tras un dilatado proceso evolutivo, generar un organismo cibernético que procesa información a un nivel que va más allá de la simple percepción, se trata del sistema nervioso, que en sus variantes más avanzadas consiste de una intrincada red de células interconectadas y enlazadas a la vez con órganos de percepción, se trata de un sistema que a bajo costo de energía procesa la información que procede de los órganos de percepción y constituye un centro de dirección para los diferentes tejidos que constituyen el cuerpo del animal. Pero la carrera evolutiva no se detuvo aquí, el sistema

nervioso continuó transformándose de modo que en el humano moderno se desarrolló el *pensamiento abstracto*, la capacidad de razonar, de elaborar imágenes, de abstraer los fenómenos que se perciben y representarlos en un *lenguaje codificado* convencional, susceptible de transmitirse entre un grupo de individuos sea por medio de señas, lenguaje hablado, escrito, por medio de representaciones artísticas, etc.

Finalmente, esas agrupaciones de individuos humanos se fueron organizando, adquiriendo relaciones de diverso tipo en aras de la supervivencia frente al medio ambiente no pocas veces hostil, el intercambio de habilidades y conocimientos, la división del trabajo y la consecuente generación de tecnología útil para extraer bienes y energía de la naturaleza dio a luz a sistemas que se denominan *sociedades humanas*, entidades de alta organización que responden a leyes propias no reducibles a las que gobiernan a sus individuos aislados.

Es precisamente la sociedad humana el sistema cibernético más avanzado que se ha desarrollado en la naturaleza, con sus sistemas de dirección (léase aparato de Estado) y procesos característicos, económicos, históricos, etc., radicalmente diferentes a los que tienen lugar en otros objetos naturales. La expresión que determina la magnitud de información que manejan estos sistemas es la ya mencionada expresión de Shannon:

$$I = - p_i \log_2 p_i \quad 4.92$$

que es el negativo de la entropía informativa:

De la cual, como se demostró ya, la entropía termodinámica que describe la ecuación de Boltzmann es un caso particular,

$$S = k \ln \Omega. \quad 4.93$$

La razón de esto reside en el hecho de que el acto de *informar* existe ya rudimentariamente en sistemas que se agrupan en la categoría de *materia no técnica inanimada*, según la terminología de Henryk Greniewski⁴⁶, que agrupa aquellos objetos que carecen de sistemas de dirección. Para delinear este concepto cabe exponer el hecho de que no solo los organismos biológicos son sistemas cibernéticos, en un cierto grado de desarrollo tecnológico, el ser humano comenzó a construir ingenios capaces de realizar operaciones de dirección, esto es, dispositivos capaces de recabar información y emplearla para dirigir procesos, un ejemplo de tales dispositivos capaces de dirigir sin la intervención humana es el termostato, un aparato que mantiene la temperatura de un sistema en una magnitud determinada, cuando esta disminuye un poco, el termostato lo detecta y pone en marcha un mecanismo que hace fluir calor al sistema, cuando el sistema se acerca a la temperatura fijada el termostato detiene el mecanismo que aporta calor al sistema obviamente el sistema no se mantiene en la temperatura exacta sino en un rango próximo pero eso no afecta el planteamiento central. A dispositivos como estos siguió una larga cadena de descubrimientos que llega hasta nuestros días con las modernas computadoras. La esencia del proceso de dirección reside en el proceso de *retroacción*, esto es, conforme un proceso se pone en marcha, el efecto generado *informa* (la temperatura del sistema en el caso del termostato) al dispositivo de control (termostato) que con base en ella modifica la marcha del proceso con arreglo a un fin (en el caso del termostato proporciona o restringe calor al sistema según se modifique la temperatura para mantenerla en un rango cercano a la magnitud deseada).

Esta variedad de ingenios constituye la *materia técnica inanimada*, dispositivos cibernéticos construidos por el ser humano, en contraposición a aquellos objetos que siendo sistemas "inorgánicos" carecen de sistemas de dirección, la materia no técnica inanimada.

⁴⁶ H. Greniewski, *Cibernética sin matemáticas*, México D. F. 1965, 218 pp.

En otras palabras, la cualidad de informar reside en ciernes en la naturaleza "inorgánica" cuya potencialidad se manifiesta en las máquinas cibernéticas y de comunicación creadas por la humanidad, y se despliega a un nivel mucho mayor en los organismos vivos, sobre todo en el sistema nervioso humano y en las sociedades humanas.

La analogía entre la mecánica estadística y la teoría de la información es una demostración contundente de lo anterior, una bandeja con mensajes que han de ser transmitidos por telégrafo u otro medio constituye un repertorio de microestados de este aparato, del mismo modo que el estado determinado por los parámetros del sistema termodinámico posee un repertorio de distribuciones de partículas en elementos de volumen y niveles de energía. El nexo entre la información como se entiende en la vida cotidiana y la entropía termodinámica se revela en forma singular en la llamada "paradoja del demonio de Maxwell". J.C. Maxwell la enunció en 1871 en su obra *Theory of Heat* (Teoría del calor), en ella postuló la existencia de un ser con capacidad de *percibir* el movimiento de las partículas de un gas, dicho ser (o dispositivo) denominado "demonio de Maxwell"; se coloca en un orificio entre dos compartimientos que contienen gas en equilibrio, y es instruido para dejar pasar a un compartimiento sólo las partículas más rápidas y al otro sólo las más lentas, con el tiempo la temperatura del gas en el primer compartimiento se elevaría y la del segundo disminuiría, generándose la correspondiente diferencia de potencial sin invertir trabajo útil, una especie de perpetuum mobile de segunda clase cuya existencia prohíbe la segunda ley de la termodinámica.

La contradicción es sólo aparente, para un ser como el demonio de Maxwell, que necesariamente posee un tamaño microscópico, no vale la segunda ley, el solamente percibe partículas que se mueven en términos de la mecánica, el no puede advertir la tendencia que el gas manifiesta a nivel macroscópico, el no percibe la temperatura. "Para el 'diablo' de Maxwell, el gas no es un cuerpo macroscópico, una vez que es capaz de elegir las moléculas por separado, y a el

no se refiere el segundo principio.⁴⁷ El demonio es, por principio, capaz de obtener información sobre la velocidad de las partículas y emplearla para disminuir la entropía del sistema aumentando su grado de restricción. Ahora bien, como las partículas de un gas emiten la misma radiación, son para todos efectos invisibles, el demonio debe emitir alguna radiación que genere un desequilibrio el cual le permita detectar a cada partícula, obtener información de ella. Pero el resultado de esta emisión de radiación es "... que el mismo demonio está sujeto a una serie de pequeños movimientos aleatorios hasta que, como dijo Norbert Wiener, cae en «cierto vértigo» que lo hace incapaz de percibir claramente. En otras palabras, deja de ser el demonio de Maxwell."⁴⁸

Esto es, la entropía del sistema disminuye, pero la del demonio aumenta e imposibilita a este para continuar, llegado cierto punto, la dirección del proceso.

Si se prescindiese del demonio y se sirviese de compuertas que se abren y cierran por acción de los golpes de las partículas, a fin de estudiar el mecanismo de este proceso, entonces, como las piezas tienen tamaños moleculares, "... tomarán parte en los movimientos moleculares (del tipo browniano). Pero estos movimientos son completamente desordenados, estadísticos. A consecuencia de ello, el orificio se abrirá según la ley de la causalidad, de modo que a través de él pasarán no sólo las moléculas rápidas, sino también las lentas y no ocurrirá la diferencia de temperaturas esperada, en concordancia completa con el segundo principio de la Termodinámica."⁴⁹

El demonio de Maxwell esta pues, *exorcizado*, pero la relación entre entropía e información permanece, la entropía es la medida del conocimiento que se posee del sistema termodinámico.

⁴⁷ A. K. Kikoin e I. K. Kikoin, *Física molecular*, 2ª, Moscú U.R.S.S., 1979, pág. 328.

⁴⁸ J. Singh, *Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética*, 2ª, Madrid, España, 1976, pág. 92.

⁴⁹ A. K. Kikoin e I. K. Kikoin, *Física molecular*, 2ª, Moscú U.R.S.S., 1979, págs. 328-329.

Los sistemas de cualquier tipo son capaces de *informarse*, siempre que posean los *canales* adecuados, esto es, las rutas, los medios capaces de permitir la interacción entre sistemas, tales como los cables telegráficos, el espacio radioeléctrico, el aire para el sonido, los enlaces químicos para las interacciones entre átomos y moléculas, etc. y a través de ellos, los fenómenos que corresponden a un sistema se *reflejan* en otros sistemas, como lo hace lo mismo un pié en el lodo fresco que una clase de literatura japonesa en el cerebro humano, pasando por la codificación de información en la memoria electrónica de una computadora. *Organización e información constituyen, en el más amplio sentido de la palabra, la forma de los objetos, una propiedad inseparable de la materia como lo es la energía, pero a diferencia de esta, la información en este sentido se crea, y se destruye, además de transformarse, comunicarse y almacenarse. Es producto de la interacción de los diferentes objetos (sistemas) que pierden o ganan forma, no sólo como organización termodinámica sino también en cada uno de sus niveles de organización.*

Si bien es cierto que la transmisión de la información nunca es completamente eficiente en los sistemas concretos, de ahí que tenga lugar una producción de entropía (dS), en los sistemas termodinámicos diferente de cero, que en los sistemas de información tiene su análogo: el ruido, "... en la telefonía, distorsiones de sonido; en la radio, los ruidos parásitos; en la televisión, la desfiguración de las formas o las sombras en las figuras y en la telegrafía, los errores de transmisión."⁵⁰ Que merman la transmisión de información.

La entropía junto a la energía liga sistemas así tan diversos si la entendemos en su sentido amplio:

$$S = p_i \log_2 p_i$$

4.94

⁵⁰ J. Singh, *Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética*, 2ª, Madrid, España, 1976, pág. 23.

Es un parámetro que describe una gran variedad de objetos, desde un gas confinado hasta una computadora, es una *función organización* para un conjunto de sistemas que pueden denominarse genéricamente *macroscópicos*, o *sistemas integrantes macroscópicos*, pues constan de partes distinguibles tanto en conjunto como por separado. La puntualización de "macroscópicos" tiene su razón de ser en el hecho de que en principio la expresión propuesta para la función organización solamente se ha demostrado en sistemas que corresponden a este nivel de organización, extenderla a otros niveles como el cuántico representa un problema fuera del alcance de esta exposición, por otra parte puede afirmarse que dicho nivel cuántico y otros de mayor profundidad deben *necesariamente* poseer una función organización, tenga la forma de Shannon u otra. De la misma forma que cada nivel posee expresiones propias para la *función energía*, que son, en última instancia, equivalentes.

Esta problemática subyace, se refleja, en la estructura misma de la ciencia. Conforme se han descubierto y se descubren nuevos niveles de organización de la materia, se abren nuevos campos de la ciencia, física, química, biología, historia, economía, informática. Y al mismo tiempo, las analogías, semejanzas, puntos de contacto entre diferentes objetos de estudio llevan a la formación de ciencias de síntesis en las cuales coexisten métodos de diferentes campos científicos. Esto es, el reconocimiento de las distintas formas de movimiento de la materia ha llevado a la elaboración de métodos particulares o "métodos de las ciencias particulares"⁵¹, los métodos de la física o de la química pueden a su vez (y de hecho así ocurre) ser fragmentados al aplicarse a determinados objetos, así han surgido la astrofísica, la cristalografía, la bioquímica, la fisicoquímica, la biofísica, la geoquímica, etc. El camino de síntesis nos devuelve a la física, química, etc., si se realizan nuevas síntesis al descubrir el parentesco de las diferentes formas de movimiento, se desarrollan ciencias como la cibernética, que estudia desde el punto de vista de la información diferentes objetos de diversa constitución. Y prolongando la síntesis de los métodos hasta la misma realidad

⁵¹ M. B. Kedrov, A. Spirkin, *La ciencia*, México D. F., 1968, pág. 19.

objetiva surge el materialismo dialéctico, que es el método más general de la ciencia, por cuanto estudia aquellas características del movimiento de la materia que son absolutamente generales.

Esta experiencia la resume adecuadamente Karel Kosik en su obra *Dialéctica de lo concreto*: "Las tentativas de crear una nueva ciencia unitaria tienen su origen en la comprobación de que la propia realidad, en su estructura, es dialéctica. La existencia de analogías estructurales entre los más diversos campos que, por otra parte son absolutamente distintos, se basa en el hecho de que todas las regiones de la realidad objetiva son sistemas, es decir, complejos de elementos que se influyen mutuamente.

"El paralelismo del desarrollo en varias ramas de la ciencia, especialmente en la biología, la física, la química, la tecnología, la cibernética y la psicología, conducen a la problemática de la organización, de la estructura, de la integridad, de la interacción dinámica, y, con ello, a la comprobación de que el estudio de partes y de procesos aislados no es suficiente, y que, en cambio, el problema esencial es el de 'las relaciones organizadas que resultan de la interacción dinámica, y determina que el comportamiento de la parte sea distinto según se examine aisladamente o en el interior de un todo'⁵². Esto último, la dependencia de la parte con el todo es particularmente aguda en el nivel de organización microscópico, sobre todo en lo que respecta a las micro-partículas que constituyen a nucleones y electrones, por el contrario, en el nivel macroscópico, las partes integrantes de un sistema que son relativamente aisladas se comportan en forma semejante a como se comportan en conjunción de ahí que se estudie en aislamiento aporte información de su comportamiento de conjunto, aunque esto no es rigurosamente cierto en todos los casos.

Finalmente, el sistema *en general* o *absoluto* es aquel sistema concreto, que consiste en una subdivisión de la realidad objetiva y es distinguible por una

⁵² K. Kosik, *Dialéctica de lo concreto*, México, D. F., 1979, pág. 58., la cita que hace Kosik es de Bertalanffy

colección determinada de parámetros (restricciones), entre los cuales se cuentan una función energía y una función organización. Esta es la definición más general de sistema y en ella puede ubicarse cualquier tipo de sistema que se pueda concebir.

5. DEFINICIÓN DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA GNOSEOLÓGICA DE MATERIA⁵³.

5.1.-Concepción materialista dialéctica de la materia, el movimiento, el tiempo y el espacio.

El átomo es la fuente del materialismo dialéctico⁵⁴. Es paradójico, sin embargo, que la concepción dialéctica de la materia y, por tanto, del sistema; no fuese elaborada por científicos naturales o científicos sociales "profesionales", ni por filósofos "de carrera", sino por revolucionarios marxistas⁵⁵. Todo un "escándalo teórico", en palabras de Louis Althusser⁵⁶. Esta es, a muy grandes rasgos, la historia de ese "escándalo".

El mundo es materia en su sentido más amplio, entendida como realidad objetiva, como todo aquello que existe objetivamente, independientemente de quién lo observe, y no sólo como *sustancia portadora de masa*.

Desde el surgimiento del pensamiento filosófico, dos corrientes se han enfrentado en el campo teórico a propósito de la noción de materia, una de ellas ha sostenido la existencia del mundo sensible como algo independiente del ser humano o cualquier ente que lo observa, la otra tendencia ha defendido la postura de que no existe el mundo sino como producto de la mente del observador, es decir, que la realidad no puede concebirse aislada del proceso concreto de

⁵³ Un concepto *gnoseológico* de la materia puede entenderse como la concepción de la materia en el marco de la relación del humano y su entorno exterior, esto es, en el marco de la teoría del conocimiento del marxismo, o sea, la dialéctica de la *cosa en sí* (lo exterior al ser humano que existe objetivamente) que mediante el proceso de conocimiento se transforma en *cosa para nosotros* (lo conocido). Es decir, lo antes desconocido se transforma, no sólo en algo conocido, sino en algo *útil*, en virtud del dominio que representa el conocimiento sobre la actuación de la cosa, esta se transforma en sistema

⁵⁴ "La destructibilidad del átomo, su inagotabilidad, la variabilidad de todas las formas de la materia y de su movimiento han sido siempre el sostén del materialismo dialéctico." V. I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo*, Pekin R. P. China, 1975, pág. 363.

⁵⁵ En virtud de lo anterior se fundamenta la obligación de acudir a la obra teórica de los revolucionarios marxistas que es fundamentalmente filosófica e histórico-social.

⁵⁶ L. Althusser, *La filosofía como arma de la revolución*, 18ª, México D. F., 1989, pág. 15.

observación, a la primer corriente se le denominó *materialismo*, y a sus detentadores *materialistas*, a la segunda corriente se le denominó *idealismo* y a sus defensores *idealistas*. Filósofos idealistas como Aristóteles y Platón tuvieron, en la filosofía clásica grecolatina como contraparte a los atomistas Demócrito, Lucrecio, Leucipo, o al dialéctico Heráclito, con quienes el materialismo comenzó a delinearse en lo fundamental, pero, carente el conocimiento grecolatino de un aparato de investigación experimental siquiera comparable al de la civilización actual (debido a que los grandes éxitos de los griegos clásicos en las matemáticas y el escaso desarrollo socioeconómico de su época marginaron a las ciencias experimentales de un mayor desarrollo), el materialismo no pasó del plano demostrativo lógico y los átomos eran sólo una idea más, aunque genial, en ausencia de una comprobación verdaderamente científica de su existencia.

En la época posterior al clásico grecolatino, esto es, el periodo que va de la caída del Imperio Romano de Occidente al Renacimiento europeo, la filosofía en Europa y Asia son dominadas por la corriente idealista, cuya máxima expresión es la escolástica con Tomás de Aquino a la cabeza, que sirve como manifestación ideológica al dominio del feudalismo como sistema económico, en el cual la religión juega un papel importante en la reproducción del modo de producción de bienes de la sociedad. Pero el ascenso del capitalismo, una nueva forma de producción de bienes surgida del seno de la sociedad feudal que apareció en la República Veneciana y luego se extendió a los Países Bajos, Francia, Inglaterra e incipientemente a Alemania, comenzó a socavar las bases económicas del feudalismo y tras ellas las ideológicas y filosóficas. Cuando el capitalismo, inicialmente confinado a las actividades usurarias y bancarias comenzó a tomar las riendas de la producción material, el afán de incrementar su capital condujo al patrocinio de la generación de tecnología para aumentar la producción, de ahí comenzó el desarrollo experimentado por las máquinas térmicas.

El Renacimiento trajo consigo, a su vez, el surgimiento de la física como ciencia por derecho propio, gracias a los trabajos de Galileo, Newton, Leibniz y

otros, que dieron a luz a la mecánica clásica, o mecánica de los cuerpos macroscópicos. Al aplicar Galileo los principios de experimentación y generalización a los fenómenos físicos desató asimismo una auténtica revolución en el campo teórico, a la vieja escolástica se le opuso una nueva variante del materialismo, el *materialismo mecanicista*. Este consideraba que todo suceso de la realidad poseía una causalidad unívoca, es decir, que todo fenómeno tenía causas bien definidas, formalmente lógicas y que todo fenómeno podía explicarse mediante la mecánica clásica, desde el movimiento de los astros (lo cual bajo ciertas condiciones es rigurosamente cierto) hasta el pensamiento humano. La cumbre de esta expectativa la enunció el físico y matemático francés Laplace y que se puede llamar el *principio del determinismo mecanicista*: "Laplace sugirió que debía existir un conjunto de leyes científicas que nos permitirían predecir todo lo que sucediera en el universo, con tal de que conociéramos el estado completo del universo en un instante del tiempo."⁵⁷ La cuestión del conocimiento para Laplace y los mecanicistas era una cuestión de grado, no existía ruptura entre un objeto y otro de conocimiento, todo podía ser investigado por medio de la lógica formal y con el aparato matemático del cálculo diferencial e integral descubierto por Leibniz y Newton y un fenómeno más complejo sólo requería una expresión matemática más compleja. El comportamiento dinámico no es en esta perspectiva sino un comportamiento clásico más complicado. Este nuevo materialismo, con exponentes como Descartes y los ilustradores franceses como Diderot, le dieron contenido teórico a la lucha de los revolucionarios burgueses que derrocaron al feudalismo europeo, al socavar la influencia y el prestigio de la religión que avalaba el dominio de la nobleza terrateniente sobre la sociedad, este proceso, que tuvo lugar a lo largo de los siglos XVII al XIX y cuyo punto culminante fueron la Revolución Francesa de 1789 y el periodo del Terror Jacobino (1793-1794), dio origen a los modernos Estados burgueses de Europa Occidental, en los cuales, en adelante, coexistirían la vieja escolástica derrotada y el materialismo mecanicista triunfante.

⁵⁷ S. W. Hawking, *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*, México D. F., 1994, pág. 82.

Pero pronto las insuficiencias del materialismo mecanicista se hicieron evidentes: es incapaz de explicar el surgimiento de fenómeno alguno, para el, todo transcurre en ciclos que no llevan a lugar alguno sino al punto de partida, así, las épocas históricas son repeticiones de épocas anteriores con algunos cambios in- esenciales, tal como ocurre con el movimiento clásico de los objetos. En el materialismo mecanicista las cualidades posibles están dadas de antemano y no hacen sino sucederse unas a otras, ciclos económicos, vida y muerte, translaciones de los planetas, etc. constituyen ciclos petrificados que devuelven al fenómeno a donde comenzó, sin dar paso nunca a una cualidad nueva.

Esta dificultad ponía en seria desventaja al materialismo frente al idealismo, este último sí posee doctrinas del cambio y el surgimiento de fenómenos, atribuye tales procesos, o bien a la acción de la psique del observador (doctrina del idealismo subjetivo), o bien a la acción creadora de un principio exterior a la naturaleza, un dios creador, la "realización de la idea absoluta" (Hegel), etc. (doctrina del idealismo objetivo), constituyen la fuente de las transformaciones de la naturaleza.

Esta era la situación cuando llegó el siglo XIX, el capitalismo era el elemento dominante en la producción en Europa Occidental y su dominio comenzaba a hacerse sentir en Asia, África y América. Conforme la burguesía incrementaba su poder y riqueza, el número y organización de los proletarios, que son masas humanas obligadas a vender su fuerza de trabajo a los burgueses en virtud de haber sido despojados de sus propios instrumentos de trabajo, también se incrementaba. Los proletarios como clase habían combatido junto a la burguesía contra el orden feudal, marchando a remolque de esta, pero liquidado el feudalismo, comenzaron a desarrollar sus propias reivindicaciones sociales, políticas y económicas que, naturalmente chocaban con las de la clase burguesa, empeñada en el incremento del capital sin miramiento alguno en la desastrosa miseria que agobiaba al proletariado. Para la década de 1840, la oposición de intereses llegó a un punto de quiebre histórico y en 1848 el movimiento

revolucionario proletario sacudió Francia, Alemania, Polonia, Hungría e Italia; solo mediante la violencia, las clases dominantes vencieron la revuelta aunque Francia volvería a ser una república y la nobleza terrateniente perdería parte de su poder en Alemania.

El estudio de este movimiento llevó al entonces filósofo alemán Karl Marx a la conclusión de que el materialismo mecanicista era incapaz de aportar algo positivo al desarrollo ulterior de la ciencia histórica, en colaboración con su compatriota Friedrich Engels se propuso elaborar una versión nueva del determinismo materialista que fuese capaz de afrontar el reto que el proletariado representaba para la ciencia de su época.

El trabajo de Marx y Engels cubrió un lapso dislocado entre la década de 1840 hasta 1895, año de la muerte de Engels (Marx moriría en 1883). La teoría que desarrollaron se conoce con el nombre de *materialismo dialéctico*, ya que reconoce el carácter cambiante, dialéctico, de los fenómenos naturales. La dialéctica es una doctrina que surgió en la Grecia clásica, reconoce el carácter cambiante de los fenómenos, la unidad existente entre permanencia y cambio, en la época de Marx, la doctrina dialéctica más elaborada había sido formulada por Friedrich Hegel, filósofo idealista objetivo alemán, Marx retomó algunos aspectos de la formulación de Hegel, pero los despojó de su idealismo y desarrolló una dialéctica totalmente nueva haciendo que esta surja de los hechos objetivos, descubriendo la dialéctica implícita en los fenómenos y no elaborando y aplicando esquemas preconcebidos a la naturaleza, como lo hacían Hegel y los filósofos anteriores. En este sentido, Marx abandona la filosofía y construye una "Teoría" general de la realidad.

Para Marx, y en sentido muy restringido para Hegel, los fenómenos consisten de un desdoblamiento de tendencias que se oponen y a la vez se presuponen una a la otra estas tendencias se denominan "contrarios". "Hay dos tipos de contrarios: formales y concretos. Los primeros representan la relación de

presencia y ausencia de alguna propiedad, rasgo, etc. Tal relación es siempre únicamente una faceta de la relación realmente existente entre los contrarios. Por ejemplo, la afirmación 'el imperialismo existe' es contraria a la aseveración 'el imperialismo no existe', pero esta última proposición carece de contenido positivo, entraña sólo la ausencia de lo que se afirma en la primera. Los contrarios de este tipo se estudian en la lógica formal, la cual prohíbe afirmar y negar simultáneamente algo en la misma relación y acepción. Por ejemplo, no se puede considerar verdadera la aseveración de que 'el fascismo en Chile existe y no existe al mismo tiempo', con la particularidad de que el vocablo 'existe' se usa en una misma acepción, es decir, en el sentido de existencia real.⁵⁸

Por el contrario, la "...dialéctica estudia los contrarios concretos. En este caso la relación se establece por varios rasgos, con la particularidad de que si la propiedad A es inherente a un contrario, está ausente en el otro, que posee la propiedad B inexistente en el primero. Estas propiedades A y B se excluyen y presuponen simultáneamente la una a la otra."⁵⁹ Ejemplos de este tipo de contrarios *pueden* ser los iones, unos iones poseen carga negativa y se conocen como aniones otros poseen carga positiva y se denominan cationes la relación entre estos contrarios se expresa en la presencia de carga negativa neta en los aniones y su ausencia en los cationes así como en la presencia de carga positiva neta en los cationes y su ausencia en los aniones. De manera que la presencia de un contrario "...no representa simplemente la ausencia del otro, sino también la presencia, al mismo tiempo, de cierto contenido positivo."⁶⁰ Un sistema concreto está conformado por muchos de estas relaciones concretas de mutua exclusión e identidad simultáneas que se denominan *contradicciones*, pero sólo una contradicción constituye el fenómeno central que determina el rumbo de un proceso dado, por ejemplo, el movimiento térmico en un sistema termostático transcurre con arreglo a leyes enteramente mecanicistas, lineales mientras no lo afecte el tiempo, en un sistema concreto, sin embargo, las contradicciones se

⁵⁸ F. Burlatski et al., *Materialismo dialéctico*, Moscú U.R.S.S., 1981, págs., 74-75.

⁵⁹ *Ibidem*

⁶⁰ *Ibidem* pág. 75.

influyen unas a otras, de manera que la marcha de un proceso puede llegar a depender de contradicciones diferentes de la principal o de la acción de sistemas externos, dependencia compleja que puede incluso hacer imprevisible la marcha de un proceso determinado, aunque esto no implica en forma alguna que la contradicción principal deje de serlo, sino sólo que se encuentra bajo influencias no determinadas. Llegado un cierto punto, la unidad y lucha entre las tendencias opuestas (contrarios) puede exacerbarse y dar fin a la contradicción principal, el fin del proceso, esto implica que ningún fenómeno o cualidad puede poseer una magnitud infinitamente grande o infinitamente pequeña, ni existir infinitamente en el tiempo. Aunque desde luego esto no implica que cese de manifestarse toda contradicción al interior del objeto, simplemente que otra contradicción que subyacía en el mismo toma el lugar de la principal, que se ha liquidado, dando paso a otro proceso. Dicho de otro modo, todo objeto constituye un sistema concreto de contradicciones de entre las cuales una se destaca como la principal, cada una de esas contradicciones existe como una forma de movimiento caracterizada por un estado de movimiento. Un estado de movimiento correspondiente al reposo no implica que no exista la contradicción, ó, más propiamente, el reposo es también movimiento.

Este proceso de liquidación se conocía en la vieja jerga hegeliana como *negación de la negación*, que no es otra cosa que la aparición de fenómenos cualitativamente nuevos en el sistema, una *transformación* del sistema.

El materialismo dialéctico reconoce así, el carácter *histórico*, la *concreción* de los diferentes procesos de la naturaleza, reconoce los fenómenos en su génesis, desarrollo y desenlace, entiende la continuidad del mundo natural como desarrollo, como la unidad indisoluble de cambio y permanencia, unidad de la continuidad y de la discontinuidad, cuestiones que no se comprendían en el materialismo mecanicista, en éste todo transcurre en ciclos inamovibles, lo que resulta en el absurdo de que lo que existe no tiene origen ni desarrollo ni fin, lo cual lo desmienten las prácticas científica, productiva y artística

Así no se desconocen las fases en que los sistemas realmente efectúan simples rotaciones, por ejemplo, ciclos económicos, procesos fisicoquímicos cíclicos, translación de los astros, etc., pero ahora se reconoce que esos ciclos contienen en sí mismos el germen de algo más, una tendencia que los puede, eventualmente llevar a alcanzar nuevos derroteros o a su fin. Porque cabe denotar que junto a la vertiente ascendente, en que los fenómenos generan cualidades nuevas, objetos más complejos, existe la vertiente descendente, la progresiva degradación de los mismos, la interrupción del desarrollo y su reversión son posibilidades reales y se materializan cotidianamente: las sociedades se desorganizan, los organismos mueren, las edificaciones se derrumban, etc.

Historicidad, concreción, continuidad y discontinuidad, progresión y regresión, tales son las características de la realidad objetiva descubiertas por Marx. El determinismo mecanicista sólo es un aspecto del determinismo dialéctico, es aquel que vale donde realmente tienen lugar rotaciones, vale ahí donde la lógica formal describe realmente los fenómenos. Marx y Engels aplicaron su descubrimiento al estudio de los fenómenos económicos y sociopolíticos de su época, arrancaron a la historia del arbitrio de la erudición cronológica y de la especulación filosófica al reconocerla como parte de la realidad objetiva, como una forma de movimiento de la materia, con todas las cualidades enunciadas de la realidad y aplicando en consecuencia un método científico en su estudio. La historia, con Marx y Engels se transformo en *materialismo histórico*, o *ciencia de los modos de producción* en la terminología de Louis Althusser, en ella se concibe que son las formas en que los humanos producen los bienes que necesitan para subsistir las que determinan las fases históricas y no el pensamiento político o la filosofía, como se pensaba hasta entonces. En la sociedad de clases, la oposición entre clases dominadas y dominantes es la contradicción principal, la que determina la marcha del proceso aunque se encuentre influida por otros factores como la organización jurídica, el nivel educativo de la población, entre muchos otros. Esta contradicción ha llevado a la

sociedad a transitar de un régimen de producción a otro, ha determinado la génesis, desarrollo y desaparición de cada modo de producción clasista que ha existido, esclavismo, feudalismo, capitalismo, socialismo. El determinismo dialéctico, pues, reconoce que la materia, en tanto que realidad objetiva posee diferentes aspectos, mismos que poseen cualidades comunes a grupos de objetos; que los agrupan, y cualidades divergentes que los particularizan, por tanto, el estudio de la realidad debe realizarse igualmente abstrayendo que concretizando, igualmente analizando que sintetizando; igualmente induciendo que deduciendo, lo mismo buscando propiedades comunes en objetos diversos que buscando cualidades divergentes en objetos semejantes, y finalmente realizando la síntesis dialéctica de los resultados de las fases separadas del conocimiento científico así obtenido.

Para cumplir las expectativas de Laplace sería necesario, pues, analizar cada nivel de organización de la materia, pero como la materia posee un número infinito de niveles de organización interdependientes que, además, manifiestan una gran variedad de fenómenos que se influyen unos a otros, las posibilidades son, por decir lo menos, exiguas, además, la materia no cesa de moverse nunca, sería, también, imposible determinar el estado completo del mundo en un momento dado. Laplace partió, en suma, de una premisa falsa: que solamente aquello que se ajustara a la lógica formal y a la mecánica clásica era cognoscible, y que, por tanto, para sostener la premisa del materialismo de que el mundo es cognoscible, este último debía ajustarse a la lógica formal y a la mecánica clásica. Por el contrario, el materialismo dialéctico llegó a la conclusión de que el mundo es cognoscible precisamente por su *materialidad*, por su carácter objetivo, por su independencia del observador, la ciencia avanza paso a paso o a saltos, conquistando nuevas esferas de conocimiento con nuevos métodos, de modo que en un momento determinado sólo pueden elaborarse pronósticos parciales desde teorías bien establecidas.

Aunque Marx y Engels habían elaborado en lo esencial sus conclusiones al respecto y las habían expuesto implícitamente en su obra económica y política entre 1848 y 1895 y las habían hecho explícitas en el libro *Anti-Dühring* (1878), el materialismo mecanicista dominó el pensamiento científico hasta entrado el siglo XX, particularmente en el *Anti-Dühring*, Engels aplicó la dialéctica materialista a muchos ejemplos tomados de la química, la biología, la física y las matemáticas; sin embargo, en la medida en que el edificio de la mecánica clásica se mantenía sólido, se mantenían los puntos de vista del materialismo mecanicista en las ciencias naturales: "En la actualidad es difícil explicar la satisfacción de los físicos de 1890. La física clásica era una casa organizada: la mecánica, la termodinámica, la teoría cinética, la óptica y la teoría electromagnética eran sus fundamentos principales, un despliegue grandioso. Cualquier problema podía resolverse con una adecuada elección de herramientas. Existían, por supuesto, uno o dos problemas que aun causaban dificultades, pero cualquiera podía asegurar que pronto se resolverían con los métodos usuales. La casa de la física tenía dos partes, la corpuscular y la ondulatoria, o el dominio de la partícula y el dominio de la onda. La materia era corpuscular, la luz ondulatoria y eso era todo. La unión entre materia y luz no parecía demasiado suave."⁶¹ En las ciencias naturales el sueño de La place se sostenía.

Entonces ocurrió lo que Castellan denomina "el terremoto", una serie de importantes descubrimientos sobre la estructura de la materia: "Durante treinta y cinco años, la física clásica se conmovió hasta sus cimientos."..."La simple mención de los acontecimientos es suficiente por el momento: el descubrimiento del efecto fotoeléctrico por Hertz en 1887. El descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895. El descubrimiento de la radiactividad por Becquerel en 1896. El descubrimiento del electrón por J. J. Thomson en 1897. La hipótesis cuántica sobre la radiación del cuerpo negro por Planck en 1900. La hipótesis cuántica sobre el efecto fotoeléctrico, formulada por Einstein en 1905. El modelo atómico según Thomson en 1907. El experimento sobre dispersión de las partículas alfa

⁶¹ G. W. Castellan, *Fisicoquímica*, Wilmington, E.U.A., 1987, pág. 473.

por Geiger, Marsden y Rutherford en 1909. El modelo nuclear del átomo de Rutherford en 1911. La confirmación cuantitativa de los cálculos de Rutherford sobre dispersión, por Geiger y Marsden en 1913. La hipótesis cuántica aplicada al átomo, el modelo atómico de Bohr, en 1913.”⁶²

La impresionante cadena de descubrimientos que condujo al conocimiento del nivel cuántico de organización, la mecánica cuántica, la estructura del átomo y, paralelamente, la mecánica relativista, condujo a algunos científicos y filósofos a la elaboración de conclusiones idealistas al abordar las consecuencias de estos avances científicos para la teoría del conocimiento y la filosofía.

Por un lado, la bancarrota del materialismo mecanicista en lo que respecta a los nuevos acontecimientos era completa, el carácter corpuscular de la luz y las propiedades ondulatorias de los cuerpos “materiales” resultaban difíciles de tragar para el sentido común, la división del átomo, hasta entonces considerado indivisible, obteniendo electrones que, para colmo parecían tener “libertad de elección” al moverse lo que hacía necesario recurrir a la estadística para estudiarlos, provocó que algunos teóricos y científicos proclamaran que no solamente el determinismo mecanicista sino *todo* determinismo debía descartarse, la teoría relativista y su equivalencia masa-energía colmaron el vaso y se habló entonces de que “la materia había desaparecido” y que sólo quedaba “el movimiento”, la escuela de filósofos positivistas adeptos del físico Ernst Mach rehabilitaron viejas consignas idealistas acerca de la inexistencia del mundo exterior al ser humano, del engaño de los sentidos, etc. Operó en pocas palabras, un renacimiento del idealismo filosófico a costa del materialismo mecanicista, incluso reconocidos científicos como Henri Poincaré rodaron al idealismo “No es la naturaleza la que nos da [o impone] los conceptos de espacio y tiempo, sino que nosotros somos los que los damos a la naturaleza”...”todo lo que no es pensamiento, es la purísima nada.”⁶³

⁶² Ibidem.

⁶³ V. I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo*, Pekín, R. P. China, 1975, pág. 325.

En realidad lo que ocurría no era la *refutación del materialismo* como suponían los idealistas y positivistas, sino que el desarrollo de la ciencia física había rebasado su contenido filosófico, el mecanicismo, con el cual había existido desde Galileo. Tenía lugar una "crisis de crecimiento" de la física y algunas escuelas idealistas se aprovechaban de esta crisis para pasar de contrabando sus tesis, para darles una justificación *científica*, declarando refutado todo materialismo, todo determinismo, tal como lo habían hecho en el campo de la biología años atrás con la doctrina del *vitalismo*, buscando hacer leña del árbol caído del materialismo mecanicista. Se pasó por alto que lo que realmente estaba ocurriendo era que se estaban abriendo nuevos campos de investigación de la ciencia física, que ahora ésta comenzaba a investigar niveles de organización distintos al que hasta ese momento le había proporcionado sus métodos y principios, el macroscópico, la rigidez del mecanicismo no permitía concebir a muchos científicos y filósofos que regiones diferentes de la realidad objetiva requerirían necesariamente nuevos métodos y principios acordes a su naturaleza para ser estudiados y que este procedimiento es algo perfectamente natural, intentar forzar a la naturaleza a acomodarse en esquemas inadecuados o insuficientes es un procedimiento filosófico condenado al fracaso, aunque esto, cabe aclarar, no implica que determinados métodos útiles para un nivel de organización no sean útiles bajo ciertas circunstancias para el estudio de otro nivel en virtud de que ambos pueden tener similitudes en sus formas de movimiento.

El estudio científico es el estudio de la realidad completa y no solo de alguno de sus aspectos, la ciencia no puede encasillarse en un nivel de organización, la transformación de sus métodos y principios no presupone su final, sino su continuación bajo formas nuevas, al igual que cualquier otro proceso la misma ciencia progresa dialécticamente conforme descubre nuevos aspectos de la materia. Los nuevos avances de la física no solo no refutaron al materialismo, al determinismo, sino que por el contrario confirmaron las tesis de su vertiente dialéctica.

La materia no puede identificarse en toda circunstancia con uno solo de sus aspectos, como lo hacía el materialismo mecanicista al identificarla únicamente con la masa en reposo de los cuerpos, en oposición a la energía asociada a su movimiento mecánico, por el contrario, *la materia es todo lo que existe objetivamente* y posee un número infinito de atributos que se reflejan por medio de los sentidos en la mente humana, no existe un sistema último en profundidad o a lo ancho. Esto lo reconocieron Marx y Engels décadas antes de la crisis de la física, pero fue pasado por alto por algunas escuelas de la física y de la filosofía, que no todas ni todas las de avanzada. Por ejemplo, Lenin nos dice: Boltzmann "...es quien ha combatido sistemáticamente la corriente machista (es decir, positivista)." "...teme, naturalmente denominarse materialista..." ..."Pero su teoría del conocimiento es, en el fondo, materialista, y expresa la opinión de la mayoría de los naturalistas.

"Deducimos la existencia de todas las cosas por las impresiones que producen sobre nuestros sentidos', dice L. Boltzmann (29). La teoría es una 'imagen' (o una reproducción) de la naturaleza, del mundo exterior (77). A los que afirman que la materia no es más que un complejo de percepciones de los sentidos, les replica Boltzmann que en este caso los demás hombres no son tampoco más que sensaciones del que habla (168). Esos 'ideólogos' – como Boltzmann dice a veces en lugar de decir filósofos idealistas – nos dan 'un cuadro subjetivo del mundo' (176), pero el autor prefiere 'un cuadro más sencillo, un cuadro objetivo del mundo.'"⁶⁴

El conocimiento no es sino reflejo, una impresión de lo que existe objetivamente e independientemente de sus procesos, el pensamiento es una propiedad de la materia, una determinada forma de movimiento de la misma, no existe pensamiento sin cerebro que lo piense. A estas conclusiones llegó V. I. Lenin en 1908 en su obra *Materialismo y empiriocriticismo*, donde hizo explícita y desarrolló la teoría del conocimiento del materialismo dialéctico.

⁶⁴ V. I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo*, Pekín, R. P. China, 1975, págs. 370-371.

Si se entiende a la materia como realidad objetiva, que existe independientemente del observador y que se refleja en la mente de este a través de los sentidos, y se entiende el movimiento como cambio en general y no solo como simple translación mecánica, puede afirmarse que la materia nunca cesa su movimiento, el estado de reposo solo puede considerarse como relativo a alguna o algunas formas de movimiento en un momento dado.

La materia se mueve pues, y lo hace en el tiempo y el espacio. Así como no puede entenderse la noción de materia sin movimiento o movimiento sin materia, tampoco puede concebirse materia fuera del espacio o del tiempo. Movimiento, tiempo y espacio son formas de existencia de la materia, el concepto de materia es el más primordial de ellos y todo, en última instancia se refiere a él.

Otra forma de existencia de la materia es precisamente la organización, la forma, no puede concebirse un sistema sin forma, un sistema puede perder organización, su forma, pero se necesitaría destruir la forma de sus sistemas componentes que son infinitos, para despojarlo completamente de organización, lo cual requiere de un número infinito de operaciones.

Las categorías fundamentales de la dialéctica, materia, movimiento, tiempo, espacio y organización se presentan ante los sentidos y la conciencia del observador como una colección infinita en profundidad y a lo ancho de manifestaciones particulares finitas, interrelacionadas indisolublemente, en los sistemas concretos.

5.2.-El sistema como ámbito del movimiento de la materia.

La materia se mueve en el tiempo y en el espacio, y lo hace, como ya sabemos, de dos formas distintas: cíclicamente y/o progresiva / regresivamente.

Ambas clases de movimiento, así el cíclico relativamente estable como el progresivo /regresivo tienen como ámbito al sistema, sólo puede hablarse de que *algo* se mueve, de que tiene lugar un movimiento de materia cuando se han precisado los componentes de un sistema. En el caso de los movimientos "de tipo mecánico", la ubicación de esto es relativamente sencilla, un punto cualquiera del sistema se considera arbitrariamente inmóvil y se considera que cualquier desplazamiento ocurre con respecto a este punto, sea de una partícula del sistema operante o del resto de los constituyentes de la frontera, por ejemplo, sea un automóvil que se desplaza sobre una carretera, si lo que interesa es el desplazamiento mecánico del móvil completo, sin atención a otros fenómenos como la generación de potencia en su interior, entonces, el sistema no puede estar restringido al propio móvil sino que habrá que considerar el tramo completo de carretera y el espacio que habrá de ocupar el automotor en su trayectoria completa.

El punto de referencia puede entonces ubicarse sobre la carretera y se considera que el coche se mueve cuando se desplaza con respecto a este punto, o bien puede situarse el punto de referencia en el móvil, y se considera que el tramo de carretera se mueve con respecto a él. No puede considerarse que el punto de referencia no pertenezca al propio sistema, si en este ejemplo se fijara *fuera* del sistema, lo que se está haciendo es ampliar automáticamente al sistema, se está automáticamente estableciendo el parámetro espacial del sistema. Y sin problema pueden extenderse estos razonamientos a sistemas como gases confinados o mezclas de reacción en fase líquida, sólidos diversos, etc., en lo que respecta a sus desplazamientos mecánicos.

En lo que respecta a otros parámetros del sistema como presión, temperatura, volumen, entropía, no pueden igualmente sino referirse al propio sistema, son *sus* parámetros, los que lo constituyen, su transformación es una modificación cuantitativa de la propia constitución del sistema, un parámetro se mueve cuando cambia, cuando se transforma, todo cambio, como se recordará, es

un movimiento, el cambio en la magnitud de los parámetros del sistema es a fin de cuentas una forma de movimiento que solo puede advertirse con respecto al estado previo del sistema dado, un parámetro se mueve, con respecto a su magnitud anterior a un proceso determinado.

Las magnitudes se determinan mediante un sistema de medición, por ejemplo, un termómetro, un manómetro, un espectrómetro, toman parte del proceso aunque lo hagan con mínima interferencia, los puntos de referencia se vuelven parte del sistema aunque interfieran en forma mínima en los procesos que tienen lugar en él, solo así puede advertirse el cambio en los parámetros del sistema, su movimiento.

En el caso del movimiento progresivo / regresivo se habla de que la organización del sistema se modifica, o bien aumenta debido al incremento de los nexos e interrelaciones de sus componentes generando nuevos parámetros del sistema, o bien la organización decrece en virtud del rompimiento, desaparición de las restricciones en su interior, y por lo tanto de parámetros del sistema, el sistema se degrada.

La constitución del sistema, en suma, es algo móvil que puede modificarse en ambos sentidos, organización o degradación con respecto al estado anterior a un proceso.

Pero es de nuevo el sistema el ámbito donde se refiere la noción de cambio, de movimiento, lo cual es lógico si se piensa que el sistema concreto es una construcción que se efectúa de tal forma que resulte observable o incluso manipulable por quien lo estudia con miras a obtener conocimiento de la estructura y comportamiento de la materia, el entorno, por el contrario, no es ámbito de la manipulación por parte del observador e incluso puede no manifestar efectos observables, en el momento en que a una parte del entorno se le determinan parámetros que se relacionan (que son o pueden ser) afectados por el

proceso que tiene lugar en el sistema, se dice que esa parte del entorno se ha acoplado al sistema, y de hecho puede considerarse parte de un sistema mayor, así sea de manera transitoria, del cual forma parte junto con el sistema operante que es donde ocurre el proceso.

Invirtiendo el razonamiento de partida puede llegarse a la conclusión de que el sistema concreto es el ámbito donde se verifica la realización del movimiento en general, el lugar donde tiene sentido hablar de que existe movimiento de la materia en el tiempo y en el espacio.

De la misma manera que el sistema concreto es el ámbito donde es válido hablar de movimiento, entonces el sistema es igualmente el ámbito donde es válido hablar de espacio, de tiempo, y, por supuesto, de materia: el sistema es aquella porción de materia que se mueve en el espacio y en el tiempo.

En otras palabras, un sistema es una manifestación particular de las formas de existencia de la materia y, por tanto, de la materia misma, a consecuencia de lo cual posee una determinada colección de parámetros que lo determinan.

CONCLUSIONES:

- La materia entendida como realidad objetiva es todo aquello que existe independientemente del observador.

- La ciencia aprehende la realidad objetiva *separando*, delimitando, de la materia, los sistemas a los que convierte en destinatarios de su atención, la ciencia sólo tiene por objeto a los sistemas.

- El proceso de separación, de delimitación, por medio de la abstracción, permite al ser humano la comprensión de determinados fenómenos que tienen lugar en los sistemas concretos. Esta reducción de los sistemas a determinados fenómenos se manifiesta como un reflejo objetivo en la mente de los observadores, como un sistema *abstracto*, la determinación de las leyes que rigen estos sistemas y la producción de conceptos que los designan, constituye el conocimiento científico.

- Las consecuencias de tal punto de vista son el reconocimiento de que la materia en tanto que realidad objetiva existe como movimiento, espacio, tiempo y organización, y que, por ende, los sistemas concretos son manifestaciones particulares de éstas categorías, y los sistemas abstractos son *reflejos* de estas manifestaciones. La materia es infinita en movimiento, espacio, tiempo y organización tanto en profundidad como en magnitud, pero los sistemas, tanto concretos como abstractos cuando se les reduce a un fenómeno principal o central son siempre finitos, en otras palabras: tanto la materia como el movimiento, el espacio y el tiempo existen infinitamente en una sucesión infinita de manifestaciones particulares concretas o sistemas en los cuales un fenómeno es siempre el principal o característico.

- Tanto los sistemas concretos como los abstractos se caracterizan por un proceso principal o central cuya contradicción dialéctica determina el tipo y magnitud del movimiento del sistema, mismo que puede ser de dos tipos:

= De tipo cíclico, que no afecta la organización del sistema y,

= De tipo progresivo/regresivo, que constituye un cambio de la organización del sistema.

- El concepto de sistema más general que puede exponerse es, entonces:

Objeto o reflejo de un objeto en que se manifiestan particularmente las formas de existencia de la materia y que por lo tanto posee determinadas propiedades, que en última instancia se reducen a una función energía y una función organización. Dicho objeto, al igual que la materia misma presenta movimientos de tipo cíclico y/o progresivo/regresivo, movimientos que *sólo* pueden ocurrir en el tiempo y en el espacio.

- La importancia de esclarecer las características del sistema posee una gran importancia metodológica, el investigador científico, el filósofo, el estudiante de ciencias deben disponer de los medios teóricos para distinguir los alcances; posibilidades y el ámbito de competencia de los distintos aspectos de la ciencia tanto teóricos como empíricos, la forma más adecuada de enlazar los distintos campos científicos y el contexto teórico global en el que se inscribe el pensamiento científico como la forma más metódica, rigurosa y acabada del conocimiento humano, es decir, no pasar por alto la necesidad de someter siempre todo hallazgo a una crítica que lo evalúe en el contexto de todo el conocimiento; esto es, desde la óptica, el punto de vista, del método más general de la ciencia: el método materialista dialéctico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Academia de Ciencias de Cuba, Academia de Ciencias de la U.R.S.S. Metodología del conocimiento científico. 5ª ed., México D. F., 1985, 445 pp.
2. Andréiev, I., Arjptsev, F., Kursánov G., Mijéiev, V., Spirkin, A., Zajárov, F., Problemas fundamentales del materialismo dialéctico. Moscú, U.R.S.S., 1967, 371 pp.
3. Althusser, Louis, La filosofía como arma de la revolución. 18ª ed. México D. F., 1989, 151 pp.
4. Althusser, Louis, La revolución teórica de Marx, 24ª ed. México D. F., 1990, 201 pp.
5. Althusser, Louis, Para una crítica de la práctica teórica: Respuesta a John Lewis. 2ª ed. Madrid, España, 1974, 103 pp.
6. Asimov, Isaac, Introducción a la ciencia. Barcelona, España, 1973, 815 pp.
7. Burlatski, F., Krombet, G., Motorshilova, N., Orúdzhev, Z., Shestopal, A., Sitkovski, E., Vasilenko, A., Zúev, K.; et al., Materialismo dialéctico. Moscú, U.R.S.S., 1981, 206 pp.
8. Callen, Herbert B., Thermodynamics: an introduction to the physical theories of equilibrium thermostatics and irreversible thermodynamics. Pennsylvania, U.S.A., 1981, 374 pp.
9. Castellan, Gilbert W., Fisicoquímica. Wilmington, E.U.A., 1987, 1057 pp.

10. Coloquios de Royaumont, El concepto de información en la ciencia contemporánea. 3ª ed., México D. F., 1975, 310 pp.
11. De Gortari, Eli, El método dialéctico. México D. F., 1982, 158 pp.
12. De Gortari, Eli, Siete ensayos filosóficos sobre la ciencia moderna. 2ª ed., México D. F., 1973, 156 pp.
13. Denbigh, Kenneth, The principles of chemical equilibrium: With applications in chemistry and chemical engineering. 4th ed. Cambridge, United Kingdom, 1997, 493 pp.
14. Engels, Friedrich, Anti-Dühring. México D. F. 1984, 334 pp.
15. García-Colín, Leopoldo., De la máquina de vapor al cero absoluto: (calor y entropía). México D. F., 1994, 147 pp.
16. Greniewski, Henrik., Cibernética sin matemáticas. México D. F., 1965, 218 pp.
17. Hawking, Stephen W, Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros. México D. F., 1994, 252 pp.
18. Jramoi, A. V., Introducción e historia de la cibernética. México D. F., 1975, 157 pp.
19. Kikoin, A. K., Kikoin, I. K., Física molecular, 2ª ed., Moscú, U.R.S.S., 1979, 526 pp.
20. Kedrov, M. B., Spirkin, A., La ciencia. México D. F., 1968, 157 pp.
21. Kosik, Karel, Dialéctica de lo concreto. México, D. F., 1979, 269 pp.

22. Laidler, Keith J. et al., Fisicoquímica. México D. F., 2002, 987 pp.
23. Lenin, V. I., Materialismo y empiriocriticismo. Pekín, R. P. China, 1975, 480 pp.
24. Mao Tsetung, Cinco tesis filosóficas. Pekín, R. P. China, 1975, 289 pp.
25. Meliujin, S., Omelianovski, M., Kutnetsov, L. V., Problemas filosóficos de la física contemporánea. México D. F. 1969, 154 pp.
26. Popper, Karl R., La lógica de la investigación científica. Madrid, España, 1980, 451 pp.
27. Resnick, Robert, Halliday, David, Krane, Kenneth S., Física. 4ª ed., México, D. F., 1996, 658 pp.
28. Salvat, Juan, Diccionario Enciclopédico Salvat. Tomo 7, Barcelona, España, 1975, 504 pp.
29. Singh, Jagjit., Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética. 2ª ed., Madrid, España, 1976, 354 pp.
30. Spirkin, A. G., Materialismo dialéctico y lógica dialéctica. México D. F., 1975, 158 pp.