

47613



T-141

**LA PARTICIPACIÓN DE
UN MODELO ANALÓGICO
EN LA CONSTRUCCIÓN
DE CONCEPTOS
DE LA FÍSICA DE FLUIDOS**

por

RAÚL ALBERTO DEAN



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

1998

47613

47613

MFN	140
Classif	T.141

**LA PARTICIPACIÓN DE UN MODELO ANALÓGICO
EN LA CONSTRUCCIÓN DE CONCEPTOS
DE LA FÍSICA DE FLUIDOS**

por

RAÚL ALBERTO DEAN

Ingeniero Mecánico Electricista, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

Remitido a la Facultad de Ciencias Humanas
en acuerdo a los requerimientos establecidos por
la escuela de Post-Graduación para
la obtención del grado de

MAGISTER EN EPISTEMOLOGÍA Y METODOLOGÍA CIENTÍFICA

en la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

1998



Firma del autor:

Certificado por:

Dr. EDUARDO H. FLICHMAN

Director de Tesis

Dr. FABIÁN H. GAIOLI

Co-Director de Tesis

*A mi esposa Ana Maria
y a nuestro hijo Franco Raúl*

LA PARTICIPACIÓN DE UN MODELO ANALÓGICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE CONCEPTOS DE LA FÍSICA DE FLUIDOS

Resumen

En este trabajo se considera la aplicación de la teoría de modelos analógicos desarrollada por Mary Hesse (1966) como metodología para sistematizar conceptos obtenidos por medio de la analogía. Se propone su aplicación a conceptos ya establecidos de la física de fluidos. Para tal fin se analizan dos casos históricos de formación de conceptos que han sido influenciados por la analogía. En forma particular, el concepto de tensión tangencial laminar empleado en el estudio del movimiento laminar de un fluido y el concepto de longitud de mezcla, que surge posteriormente y que fue empleado en el estudio del movimiento turbulento de un fluido, serán tomados como casos de análisis. Éstos tienen la particularidad de que el modelo analógico que participó en el primero tuvo influencia posteriormente en el concepto de longitud de mezcla. Es considerada únicamente la perspectiva sobre modelos analógicos que ofrece la obra de Hesse [11]. La noción de analogía que posee esta autora es considerada de importancia porque su propuesta de modelos analógicos permite disponer de un medio generador de hipótesis en el contexto de descubrimiento de una teoría. La idea básica del trabajo es aplicar la teoría de Hesse a los casos mencionados, por lo cual no se hará referencia a otros autores que han desarrollado teorías sobre modelos analógicos en otras direcciones. La primera parte de este trabajo está destinada a destacar distintos aspectos epistemológicos relacionados con la teoría de modelos analógicos, y la segunda parte se dedica a la presentación y al análisis de los conceptos en el contexto de descubrimiento de una teoría.

Abstract

This work considers the application of Hesse's (1966) theory on analogical models as methodology for the systematization of concepts obtained through analogy. It's application to concepts of physics of fluids already established is proposed. The aim of this thesis is to analyse two historic cases on concept formation influenced by the analogy. Particularly, the tangential shear stress concept employed in the laminar motions and the mixing length concept arising afterwards and that were employed in the turbulent motions of a fluid are considered as case studies. These concepts possess the characteristic that the analogical model present in the first concept influenced the mixing length concept. The only perspective considered here is the perspective of analogical models proposed in Hesse's work[11]. Hesse's notion of analogy is considered of importance because her proposal on analogical models provides a hypothesis method generating in the context of theory discovery. The main purpose of the thesis is to apply Hesse's theory to the cases mentioned, therefore reference to other authors that have developed analogic theories in other directions will not be considered. The first section of this work is devoted to highlighting different epistemological aspects of the analogical model theory, and the second section is devoted to the presentation and analysis of the concepts in the theory discovery context.

Tabla de contenidos

Título	01
Dedicatoria.....	03
Resumen	05
Abstract.....	06
Contenidos.....	06
Agradecimientos.....	10
Introducción	10
Primera Parte	
Teorías y Modelos.....	13
Analogía y su necesidad de empleo.....	16

Los Modelos Analógicos y la noción de Analogía en la obra de Mary Hesse.....	26
Analogía Material.....	33
Razonamiento analógico basado en analogía material.....	34
El surgimiento del modelo analógico.....	35
El contexto de descubrimiento de una teoría.....	36
La participación e influencia del modelo analógico en el contexto de descubrimiento y desarrollo de una teoría.....	38
El contexto de justificación.....	49
Recapitulación.....	51

Segunda Parte

Algunos aspectos básicos de fluidos.....	53
1687 - Hipótesis sobre la resistencia interna de un fluido. El surgimiento del concepto de tensión tangencial laminar.....	56
Un modelo analógico que brindó respuestas en el estado estacionario de un gas y en el movimiento laminar de un fluido.....	58
Perspectiva histórica sobre la identificación del movimiento turbulento de un fluido y una necesidad de respuestas.....	64
El surgimiento del concepto de longitud de mezcla.....	66
Algunas propiedades observadas en el movimiento turbulento de un fluido.....	67
Análisis de los conceptos en el contexto de descubrimiento desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos.....	70
Concepto de tensión tangencial laminar.....	71
Concepto de longitud de mezcla.....	78
Conclusiones.....	83
Conclusiones adicionales.....	87
Sobre la analogía material y la aprehensión de la realidad.....	87
Sobre la teoría de modelos analógicos como medio adecuado para el análisis de teorías científicas.....	93
Sobre las fuentes de conocimiento.....	94
Anexo I: Un ejemplo de analogía formal.....	96
Anexo II: Aspectos de la Teoría de Prandtl.....	97
Referencias.....	99

*En la ciencia, la obra es la hipótesis, la teoría;
y el objetivo de la actividad es
la verdad o la aproximación a la verdad, y la fuerza explicativa.*

*Este objetivo es considerablemente constante;
y ésta es la razón por la que hay progreso.*

*Es un progreso que puede durar siglos:
el progreso hacia teorías cada vez mejores.*

Karl Popper

Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud al Dr. Eduardo Flichman y al Dr. Fabián Gaioli por la valiosa y esmerada dedicación a la dirección del presente trabajo, quienes con sus críticas contribuyeron a que la concreción del mismo se haya convertido en una tarea donde la actitud reflexiva en el análisis fuese un elemento siempre presente. Las observaciones realizadas me fueron de gran utilidad para corregir varias imprecisiones y mejorar la redacción definitiva. Los intercambios de ideas, con el objeto de aclarar conceptos y definir puntos de vista, constituyeron sin lugar a duda, una agradable experiencia relacionada con la preparación de este trabajo.

También el agradecimiento porque con sus observaciones transmitieron la importancia de la actividad científica y presentaron a la Epistemología como una especialidad que modestamente ofrece a la comunidad científica reflexiones sobre distintos aspectos problemáticos involucrados en la actividad científica y en los productos que de ella se obtienen, y como una disciplina que le permite al hombre advertir el carácter interdisciplinario de las ciencias.

Introducción

La modelización se considera un método importante en la investigación científica contemporánea, de tal forma que ha surgido una variedad muy amplia de significados sobre lo que se entiende por “modelo” y su forma de empleo. Un aspecto que destaca la importancia de la utilización de modelos es el hecho de que la mayoría de las teorías se generan dentro de la matriz de alguno de ellos.

Este trabajo está dirigido a tratar con un tipo particular de modelos y su influencia en teorías científicas. Debemos explicitar qué entenderemos por modelo y analizar la justificación del empleo de los mismos como también de la función que estos desempeñan en la construcción de teorías y en la expansión de su ámbito de aplicación.

Los modelos referidos son los “modelos analógicos”, contruidos por medio de analogías entre un dominio de fenómenos bien conocidos y familiares y otro dominio de fenómenos para los cuales tenemos escaso conocimiento o un conocimiento incompleto y la necesidad de obtener el conocimiento de este dominio. Luego de contruidos, razonar con este tipo de modelo permite obtener, en determinadas circunstancias, interpretaciones teóricas acerca del nuevo dominio, donde esto se logra explorando y

extendiendo los recursos conceptuales disponibles en el dominio conocido. Así surgen teorías desarrolladas por argumentos desde sistemas análogos o modelos analógicos, las cuales si resultan exitosas permitirán un avance en el conocimiento del nuevo dominio.

En el ámbito de la física de los fluidos surgen dos conceptos que resultan de alguna manera relacionados por un modelo analógico. Conceptos éstos vinculados con el estudio del movimiento de los fluidos.

La mayoría de los líquidos y gases en la naturaleza están en un movimiento desordenado, donde combinado con un patrón general de flujo existe usualmente un movimiento aleatorio complejo el cual no está directamente asociado con la agitación térmica de las moléculas individuales, este movimiento macroscópico complejo recibe el nombre de "turbulencia". También se encuentran flujos sin una apreciable turbulencia, éstos se denominan flujos "laminares", por ejemplo en el agua que sale desde una canilla lentamente se observa que el chorro tiene un aspecto suave, como vidrio pulido; en este caso el movimiento es laminar, como si cada porción de fluido estuviese contenida en capas o láminas que van deslizándose una respecto a otra. En un flujo turbulento esta característica de moverse como si estuviesen en capas o láminas, se pierde.

Estas situaciones observables del movimiento de un fluido y sus consecuencias han sido estudiadas científicamente con el objetivo de poder cuantificarlas y predecirlas. Sin embargo sólo parte del movimiento, en particular el movimiento laminar, ha logrado razonablemente ser descrita por un modelo.

La turbulencia es relevante al movimiento pero *se considera que* no se dispone en la actualidad de un modelo que la represente adecuadamente en una forma generalizada y con el cual se pueda investigar el fenómeno de la turbulencia en fluidos en su totalidad. En una forma parcial, el modelo que brindó explicaciones en el movimiento laminar, tuvo su influencia al tratar de explicar algunos aspectos de la turbulencia.

El fenómeno de la turbulencia en flujos de fluidos se comenzó a estudiar en el siglo XIX, pero sus orígenes siempre fueron imperfectamente conocidos y comprendidos. Su observación es común y fácil, no requiere de ningún equipo de costo elevado, pero la comprensión de su naturaleza es difícil como lo es también la predicción de su ocurrencia. Surge frente a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales cuando el fluido se encuentra en algún estado particular inestable. La turbulencia en flujos de fluidos es básicamente un proceso irreversible originado en una inestabilidad.

En un libro de texto de la década del 70 dedicado específicamente al estudio de la turbulencia se encuentra un párrafo que presenta vigencia y sintetizaría el estado actual

de estudio sobre el tema : "En la turbulencia, las ecuaciones no dan la historia completa. Uno deberá estar dispuesto a usar (y ser capaz de usar) simples conceptos físicos basados sobre la experiencia para construir el puente entre las ecuaciones y los flujos reales. No queremos implicar que las ecuaciones sean de poco uso; meramente queremos hacer notar que la turbulencia necesita espíritus inventores al tiempo que de analistas dedicados. Reconocemos que éste es un muy específico y posiblemente parcial punto de vista. Es posible que en el futuro, alguien logrará desarrollar una teoría completamente formal de la turbulencia. Sin embargo, creemos que existe una mayor oportunidad de desarrollar un modelo físico de la turbulencia con el espíritu del modelo de Rutherford del átomo. El modelo no necesita ser completo, pero sí debería ser muy útil. El desafío real, que nos parece, es que hoy no existe un modelo adecuado de turbulencia." ([28],p.04) (Traducción propia)

Quizás uno podría pensar que desde comienzos de la década del 70 hasta la década del 90 (veinte años después) se pudiese haber encontrado una teoría completamente formal para abordar el estudio de la turbulencia, sin embargo no parece que esto haya ocurrido. Veamos una opinión que aparece en un trabajo publicado en el año 1993, dedicado al estudio numérico de la turbulencia. Grau Vidal presenta el siguiente panorama sobre el estudio de la misma: "El régimen de flujo turbulento es el más común en la mayoría de flujos a escala ingenieril o geofísica. La importancia práctica de la turbulencia, juntamente con el desafío intelectual de constituir el único problema no resuelto de la mecánica clásica, ha atraído la atención de muchos investigadores desde los campos de la física, la ingeniería y las ciencias matemáticas. Actualmente, se puede considerar que el estudio de los flujos turbulentos tiene abiertos tres frentes de ataque, el experimental, el teórico y el computacional, siendo este último el que, impulsado por el advenimiento y posterior desarrollo de los ordenadores digitales, ofrece más perspectivas de crecimiento." ([09], p.59)

Desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, final del siglo XX, el fenómeno de la turbulencia ha dado origen a un número muy variado, tanto cuantitativo como cualitativo, de teorías y la analogía fue un medio utilizado para lograr alguna de ellas. *En particular trataremos la analogía que fue postulada entre el camino libre medio de los pequeños movimientos aleatorios microscópicos de las moléculas en un gas y los movimientos aleatorios de gran escala ejecutados por "partículas fluidas" en movimiento turbulento, lo cual condujo al concepto de longitud de mezcla y estimuló luego a investigadores a proponer hipótesis, que involucraron el empleo del concepto*

de una longitud de mezcla para movimientos turbulentos análogo al camino libre medio de los movimientos moleculares, para explorar las consecuencias. La longitud de mezcla fue similarmente considerada como una distancia media recorrida por una partícula fluida sobre la cual retiene los valores iniciales de sus propiedades, y al final del recorrido la mezcla con los valores de las propiedades de las partículas de su entorno. Prandtl (1926), von Kármán (1930) y Taylor (1932) emplearon este concepto para estudiar distintos aspectos de la turbulencia ([06], p.299). La primera parte del trabajo se dedica a tratar distintos aspectos epistemológicos sobre los modelos analógicos y en la segunda parte se analiza el concepto de longitud de mezcla desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos de Mary Hesse. Si bien se lo ha utilizado para tratar distintos aspectos de la turbulencia, limitaremos el presente trabajo a su vinculación con otro concepto, como es el de "tensión tangencial en un fluido".

Primera parte

Teorías y Modelos

¿Qué es una teoría? ¿Cuál es la importancia de una teoría? Estas son preguntas para las cuales de alguna manera tenemos que dar una respuesta y lo haremos en orden inverso al presentado. Sin entrar en la problemática particular que pueda estar involucrada en cada una, trataremos de dar una respuesta a cada una de ellas en una forma simple.

En la investigación de un dominio, lograr una teoría se considera de importancia ya que es generalmente acordado que cumplen tres funciones principales:

- 1) la predicción exitosa del comportamiento del sujeto o blanco de estudio en condiciones experimentales bien definidas,
- 2) la representación teórica de la estructura causal del dominio, donde desde ésta representación podemos explicar el comportamiento del sector de la realidad de estudio,
- 3) brindar una fundamentación a la tecnología.

Entonces podemos decir que: predecir, explicar y fundamentar tecnologías son aspectos relevantes que convierten al empleo de una teoría como de suma importancia en la ciencia, en consecuencia, si existe algún medio portador de conocimientos que logre ejercer una influencia positiva en el desarrollo de una nueva teoría, bien merece un espacio para su análisis.

Con respecto a lo que concierne a la importancia de una teoría, los partidarios de una concepción realista de la ciencia y partidarios anti-realistas difieren en interpretar estos propósitos sólo en que los realistas tienden a ponerlo en orden inverso de importancia e interpretar “la representación de la estructura causal” en términos de descripciones literales e idealmente verdaderas del estado inobservable del mundo .

Hemos mencionado porqué una teoría es importante, ahora bien, a la pregunta ¿Qué es una teoría? podríamos responder de la siguiente manera: “*Una teoría es un conjunto de suposiciones, conjeturas o hipótesis que el científico formula acerca de un sector de la realidad con el objetivo de predecir , explicar, y también poder producir modificaciones sobre ese sector de la realidad con el empleo de alguna determinada tecnología*”. Se considera que una *teoría* está formada por un conjunto de enunciados vinculados entre sí por medio de reglas lógicas que permiten hacer deducciones. Algunos de estos enunciados constituyen el punto de partida de una teoría en el sentido que a partir de ellos, empleados como premisas, es posible iniciar una serie de razonamientos y obtener conclusiones que explican o predicen un fenómeno de nuestro interés. Algunos de los enunciados iniciales pueden contener términos que se denominan teóricos. En las teorías se pueden detectar hasta tres niveles de enunciados, un primer nivel formado por todos aquellos enunciados singulares referidos a observacionales, un segundo nivel constituido por enunciados correspondientes a generalizaciones empíricas, y un tercer nivel de enunciados generales los cuales involucran la presencia de términos teóricos. Las premisas pueden encontrarse en el tercer o segundo nivel [01].

Una deducción desde las premisas que conduce a una conclusión que describe lo que sucede se llama una *explicación*, son respuestas a preguntas del tipo ¿por qué? Si la conclusión resulta de haber razonado en función de la pregunta ¿qué sucederá si? se está realizando una *predicción* acerca de un hecho no observado.

Se denomina “consecuencias observacionales” a las conclusiones que vinculan directamente con el sector de la realidad que se investiga. A partir de estas consecuencias observacionales se juzga acerca de la utilidad de la teoría provocando, bajo condiciones controladas, que el fenómeno en estudio genere con sus mecanismos internos e inobservables las consecuencias observables que la teoría predice o bien esperar que el fenómeno se manifieste en forma natural. Existen en ciencia situaciones donde no podemos modificar variables, hay que esperar que se modifiquen solas, por ejemplo en astronomía. En otras palabras, es necesario realizar experiencias sobre el sector de la realidad, para poner a prueba la teoría.

Finalizada la experiencia se contrastan o confrontan los resultados experimentales con las consecuencias predichas por la teoría. Como resultado de la contrastación pueden acontecer dos cosas: que exista acuerdo entre los resultados y las consecuencias observacionales, o bien que exista desacuerdo. Si ocurre lo primero se dice que la teoría es corroborada, ha pasado una prueba en forma exitosa, y en el segundo caso se dice que la teoría queda refutada o falsada. En principio la ausencia de falsaciones permite seguir “creyendo” en la teoría, es decir, permite seguir conservando la teoría y emplearla para el desarrollo de nuevas investigaciones, en este estado la teoría de alguna manera va aportando conocimiento al nuevo dominio [01].

Las explicaciones y predicciones de una teoría, si resultan exitosas, no son otra cosa que contrastaciones en las cuales la teoría ha pasado una prueba. Por el contrario, si la teoría fracasa en la explicación de un hecho o predice algo que no sucede, queda falsada; esto no significa que los científicos abandonen esta teoría inmediatamente, pero esto ya está dando una indicación que en la teoría algo podría no estar funcionando bien.

El propósito primario de las teorías científicas es habilitarnos para realizar predicciones exitosas y dar explicaciones causales de fenómenos observables y de las relaciones regulares que existen entre ellos, donde tales explicaciones deberán hacer referencia a las estructuras subyacentes y los mecanismos involucrados en los procesos causales. La tarea de las teorías consiste en describir estas estructuras y mecanismos, ambos generalmente inobservables. Así, la característica central de una teoría es la descripción de estos inobservables, y de la forma en la cual ellos trabajan para generar los variados fenómenos observables que queremos explicar y predecir. Esta característica puede ser expandida considerando, en lo siguiente, la función de los modelos y analogías en las teorías.

Consideraremos básicamente un modelo como un sistema útil para describir estructuras y mecanismos, los cuales, a menudo, no están disponibles a la observación, aún con el uso de instrumentos científicos. La función que cumplen los modelos en una teoría científica es fundamental, según Hesse, para el desarrollo de las mismas. Llamar a algo un modelo es sinónimo de referirse a un estado relativamente temprano en el proceso de construcción de una teoría, en el cual el uso de fuentes para la construcción del modelo es de considerable importancia, y el estado del modelo como una correcta representación del sector de la realidad en estudio es aún altamente especulativa.

¿Qué referencias o a partir de qué cosa nos basamos para construir un modelo? ¿Qué medio o herramienta podemos disponer para la construcción del mismo? ¿Qué se espera

de un modelo una vez construido? Si bien algo ya se ha dicho en contestación a alguna de estas preguntas, para profundizar sobre las mismas comenzaremos con el concepto de analogía.

Analogía y su necesidad de empleo

Clásicamente el estudio de la analogía estuvo interesado o comprometido con significados analógicos (relacionados a la metáfora), y con argumento analógico, el cual fue considerado en textos de lógica standard en el siglo XIX como una pobre relación de razonamiento inductivo e hipotético. Estos dos aspectos comenzaron a marchar juntos en este mismo siglo con una discusión explícita de significados y argumentos desde el punto de vista de modelos científicos. Subsecuentemente la filosofía positivista de la ciencia añadió “analogía” a sus consideraciones de argumento inductivo como un importante ingrediente de la inducción.

Mary Hesse, en su trabajo *Models and Analogies in Science* [11], analiza y resalta la importancia que analogías y modelos han tenido y tendrán en la ciencia. Analiza aspectos involucrados con el significado analógico y con el argumento analógico. Considera el significado analógico aportado por los modelos como crucial para el entendimiento de conceptos teóricos, y el argumento analógico con modelos como necesario para el desarrollo y evolución de las teorías científicas. Comenzamos con esta noción, *analogía*, sin considerar por el momento la conceptualización que sobre la misma realiza Hesse. Al concepto de *analogía* se lo encuentra entendido de diversas maneras, algunos *significados* clásicos son:

- 1) *Proporción matemática*, como por ejemplo $(2/4) = (4/8)$.
- 2) *Inferencia basada en que si dos o más cosas acuerdan una con otra en uno o más aspectos entonces ellos probablemente acordarán en otros*, por ejemplo, conociendo que los triángulos en geometría plana son similares a los tetraedros en la geometría sólida en algunos aspectos entonces podríamos conjeturar que ellos acordarán aún en otros, esto es, frente a un teorema verdadero para los triángulos se conjetura que tiene un símil verdadero para los tetraedros.
- 3) *parecido en algunos particulares entre cosas diferentes*, como un ejemplo considere la relación “la corteza es a un árbol como la piel es a un ser humano”, aquí la piel humana y la corteza de un árbol son cosas diferentes excepto que ambas son cubiertas protectoras de algún objeto;

4) *una forma de hablar involucrando una extendida o elaborada comparación entre dos cosas o situaciones*, así las metáforas son consideradas como vehículos lingüísticos para llevar analogías;

5) *correspondencia en función entre órganos o partes de diferente estructura u origen*.

Resumiendo podemos decir que: *la analogía es considerada como un medio primario a través del cual transferimos conocimiento desde un dominio a otro*. En la práctica científica se puede detectar el empleo de la analogía como medio o “herramienta” para la transferencia de conocimiento de un dominio a otro, pudiéndose detectar en algunos casos que fue utilizado para la construcción de modelos, que luego tienen influencia en el desarrollo de una teoría que asimila intelectualmente el nuevo dominio de estudio. Cuando se investiga un determinado dominio, que se denominará “blanco” en el sentido de que existe un conocimiento escaso del mismo, se pueden tener *propósitos* tales como: describir propiedades del objeto “blanco”, predecir estados futuros de comportamiento de “b”, explicar alguna característica importante de “b”, resolver algún problema de acción concerniente a “b”. Estos objetivos son los que debe alcanzar luego la teoría que se formule. Presentaremos distintos casos, algunos históricos, donde intervienen *analogías* y *modelos*, ignorando por el momento la diferencia entre los dos conceptos.

Caso 1- En algunas circunstancias puede estar prohibido investigar el blanco “b” en una forma directa, por ejemplo el estudio sobre el ser humano del efecto de una determinada droga, aquí razones morales imponen el límite de *no experimentar* directamente sobre el ser humano. La experimentación con animales en medicina y biología es una práctica común, los resultados provenientes de estas experiencias se utilizan luego para sacar conclusiones acerca de lo que podría pasar con el ser humano. También razones morales imponen límites en psicología cuando se quiere experimentar cómo los hombres se comportarían en una situación crítica después de una catástrofe nuclear; en las ciencias sociales se presentan también estos límites cuando se quiere investigar la evolución de la economía, moralmente no se tiene derecho para experimentar directamente con los bienes de una población.

Caso 2 - Además de razones morales que impidan estudiar algo directamente pueden existir otras, por ejemplo puede ser el hecho que la investigación de un sector de la realidad involucre tiempos muy largos de estudio en comparación con el tiempo de vida del investigador o de los tiempos en que se necesitan conocer resultados. En este caso

también se necesita recurrir a algún método indirecto, un ejemplo de tal situación la encontramos en el estudio llevado a cabo por Charles Darwin sobre la selección natural.

Caso 3 - Puede ocurrir también, que nos encontremos en una situación a investigar tal que no estemos limitados ni por razones morales ni por razones prácticas para realizar una investigación, pero el tema de estudio implica conocer estructuras y mecanismos de funcionamiento que sólo pueden ser observados por sus consecuencias, por ejemplo: un átomo y su constitución interna, aquí necesitamos también un método indirecto que nos ayude en la investigación.

Otro ejemplo: podemos encontrarnos también con situaciones en las cuales tenemos posibilidad de estudiar el blanco directamente pero cuando realizamos experiencias los resultados de las mismas no se pueden predecir exactamente porque el proceso dinámico involucrado presenta sensibilidad a condiciones iniciales ¿A qué llamamos un proceso dinámico? A un proceso donde están involucradas las acciones que se ejercen sobre un objeto de estudio y los sucesivos estados que va adquiriendo el objeto con el transcurrir del tiempo como consecuencia de haberse ejercido sobre el mismo estas acciones. La relación que existe entre las acciones y el estado del objeto a medida que transcurre el tiempo deja establecido un proceso que se denomina dinámico.

Tomemos un ejemplo muy simple para referirnos a este caso, imaginemos un balón esférico que se encuentra en un estado de reposo sobre el pico de una montaña, en este caso se dice que el balón se encuentra en un estado de equilibrio inestable porque si nosotros producimos una perturbación, por ejemplo tocándolo con el dedo o bien por una pequeña brisa que actúe sobre el balón, el mismo no retorna a la misma posición después que la perturbación haya cesado, el cuerpo adquirió un estado de movimiento inmediatamente después de ejercidas las acciones y finalmente el balón adquiere o no nuevamente el estado de reposo pero en un lugar distinto al original. Adicionalmente en este caso se puede visualizar que pequeñas variaciones de la dirección del viento puede provocar que el balón comience su descenso por el lado Norte, noroeste, noreste o en cualquier otra dirección, es decir son casos en los cuales si se reitera la misma experiencia los resultados finales no se repiten exactamente a causa de que pequeñas variaciones en condiciones iniciales dan lugar o provocan grandes variaciones en el estado final. En el caso del ejemplo del balón, todavía tenemos suerte de estar estudiando o investigando un objeto observable, pero, existen situaciones físicas de interés para determinados campos de investigación las cuales presentan sensibilidad a condiciones iniciales y donde el blanco “b”, dominio de la investigación, es inobservable. Un ejemplo

de tal situación lo encontramos en lo que se denomina turbulencia en un fluido, sus consecuencias son observables, no así los mecanismos actuantes internamente al fluido que conducen a que su evolución dinámica presente puntos de inestabilidad sensibles a condiciones iniciales. Sobre la descripción de la turbulencia se volverá en la segunda parte de este trabajo.

En este momento interesa rescatar lo siguiente: ¿cómo se ha procedido en estos casos, o en algunos de ellos, donde existen límites para realizar una investigación?

En el caso del estudio de los efectos que producen nuevos medicamentos o drogas a través de la experimentación con animales se conoce que estos últimos poseen comportamientos similares con el ser humano en el aspecto que se investiga, de esta manera los conocimientos obtenidos en el dominio de la experimentación con animales se transfieren al dominio que estamos imposibilitados de estudiar directamente por razones morales.

En el caso de la teoría de selección natural, Darwin recurrió al conocimiento ya establecido sobre la cría selectiva realizada por el hombre y supuso similitudes con la selección en la naturaleza (“selección natural”), “Así como el hombre puede producir un resultado grande en las plantas y animales domésticos sumando en una dirección dada diferencias individuales, también lo pudo hacer la selección natural, aunque con mucha más facilidad, por tener tiempo incomparablemente mayor para obrar” ([05],p.104). Con la ayuda de reconocer y suponer ciertas similitudes surge su teoría de la evolución por medio de la selección natural.

En el estudio del átomo, en una determinada etapa histórica, a este nuevo dominio inobservable, del cual se detectaban fenómenos observables, se lo asimiló al conocido dominio del sistema planetario, surgiendo la analogía de Rutherford - Bohr entre la estructura del sistema solar y la configuración de las partículas subatómicas.

Nos referiremos ahora con un poco más de extensión a estos dos casos porque se pueden extraer algunos aspectos que interesan al tema tratado. Durante la primera década de este siglo, el estudio intensivo de los diversos rayos presentes en el tubo de rayos catódicos y de las radiaciones emitidas por el radio permitió sacar numerosas conclusiones importantes acerca de los átomos y las partículas de que están compuestas.

Estaba altamente confirmado que el átomo existía. Todos los trabajos de los químicos y gran parte de la labor de los físicos lo señalaban con gran certeza. Se sabía también que el átomo contenía pequeñas partículas fundamentales provistas de masa y carga eléctrica.

El interrogante fundamental, sin embargo, era el siguiente: ¿en qué forma estaban ordenadas esas partículas?

Entre los grandes precursores en este campo se encuentra Lord Rutherford. En 1911 decidió averiguar algo más acerca de la estructura de los átomos bombardeándolos con partículas de alta energía y estudiando el efecto de las colisiones. Para tal fin recurrió a las partículas alfa emitidas por los átomos radiactivos. Rutherford descubrió que en término medio, una partícula alfa pasaba a través de unos 200.000 átomos antes de sufrir una desviación seria. Puesto que se sabía que la partícula alfa sólo podía ser detenida por un núcleo atómico macizo, surgía que este núcleo sólo ocupaba una reducida fracción del volumen atribuido al átomo. Como resultado de estos experimentos, Rutherford propuso el modelo atómico basado en el sistema solar, que pronto fue ampliado por el danés Niels Bohr, ganador del premio Nóbel. Según este modelo, un átomo consiste en un centro pequeño, en el que está concentrada prácticamente toda la masa. Este centro se llama núcleo, y tiene carga positiva. Rodeando a este núcleo y ocupando un espacio millares de veces mayor, hay un número de electrones suficientes para compensar exactamente la carga del núcleo. Por analogía con nuestro sistema solar, estos electrones se llamaron electrones planetarios. La mayor parte del átomo consistía sencillamente en espacio vacío ¿Podían los electrones moverse en torno al núcleo siguiendo cualquier órbita, o a cualquier velocidad? La respuesta a esto fue dada en 1913 por Niels Bhor, quien introduce unas variantes significativas. Su teoría fue aceptada en seguida porque contribuía a explicar los espectros lineales “identificadores” producidos por materiales que emiten luz. Bohr señaló que cuando un electrón saltaba de una órbita a otra interior la diferencia de energías era irradiada en forma de fotón. Sin entrar en mayores detalles por ahora diremos que esto le permitió entender las líneas espectrales que se podían observar a través de un instrumento, el espectroscopio, que permite analizar la luz que emiten las distintas sustancias.

En este caso de la propuesta del modelo solar del átomo, las observaciones previas realizadas estaban fundadas científicamente, existía un conocimiento y tecnología que permitía detectar el paso de las partículas alfa, por ejemplo, al pasar a través de un instrumento de visualización llamado “cámara de niebla” se observaba un trazo característico que se lo hacía corresponder a la existencia de una partícula alfa. Se disponía también de otros instrumentos que permitían cuantificar el número de partículas, tal como el contador Geiger.

Con el modelo solar del átomo de Rutherford se presuponia la validez de toda la infraestructura tácita de la mecánica newtoniana, que siempre contemplaba el movimiento en términos de trayectorias y partículas. Al aferrarse a este conjunto de ideas subyacentes, resultaba imposible tratar la teoría del movimiento como ondas como una forma posible que podía conducir a nuevos campos de la realidad. En lugar de ello se creyó que la teoría de Newton, junto con toda su infraestructura de ideas sobre partículas y trayectorias era la que de manera esencial correspondía a la realidad del nuevo dominio que se investigaba.

Desde 1860 los científicos estaban capacitados para considerar el movimiento como ondas como una forma posible y que otorgaba una nueva visión de la realidad. Esto exigía superar el presupuesto común, aceptado durante siglos, que la naturaleza está constituida solamente de cuerpos básicamente semejantes a los de la experiencia ordinaria, aunque más pequeños. Uno de los pasos fundamentales para cambiar esta visión lo dio Niels Bohr, quien propuso que los electrones tenían órbitas que podían cambiar de manera discontinua. Así de esta manera el pensamiento científico arrastró una difícil conjunción de conceptos tradicionales y cuánticos. Hasta las concepciones radicalmente nuevas de De Broglie (1924), Heisenberg (1925) y Schrödinger (1926), se dice que la física no fue capaz de producir una teoría del átomo completa y consistente. El modelo de Rutherford - Bohr es un ejemplo extraído de la historia de la ciencia el cual tiene importancia en lo referente al tema que estamos tratando, teorías desarrolladas por modelos analógicos, por lo menos en dos aspectos, el primero por el hecho que el modelo de Rutherford, modelo solar, surge de una analogía; segundo, es un caso de coexistencia de conceptos muy diferentes y quizás “inconmensurables”. Un “inconmensurable” entre comillas porque muy posiblemente, si bien no lo vamos a analizar, exista alguna analogía que esté sirviendo de nexo para que esta inconmensurabilidad no sea tal.

Comencemos ahora a presentar los aspectos de la analogía que aparecieron en la teoría de Darwin quien había recogido una gran cantidad de datos sobre los cambios experimentados por los animales domesticados y las plantas cultivadas. Con la ayuda de estos datos detectó que la selección realizada por el hombre podía producir también diferencias tan grandes, entre el tipo ancestral y el tipo mejorado, como las que se encuentran en la naturaleza entre las especies relacionadas. En su autobiografía decía: “Durante algún tiempo no pude entender cómo se podía aplicar la selección a los organismos que vivían en estado natural”. Como otros naturalistas de la época reconocía

el hecho de la lucha por la vida. Fue en 1838 cuando leyendo la obra de Malthus sobre la población se le ocurrió una respuesta: la selección natural, un mecanismo que llevaba inevitablemente a la conservación de las variaciones más aptas y a la desaparición de las menos aptas. La afirmación básica de Malthus, que las poblaciones tendían a crecer en proporción geométrica si no se le ponía algún freno, permitió a Darwin darse cuenta de la intensidad con que actúa la selección natural. Escribió: “finalmente había encontrado una teoría con la que trabajar, mi teoría”, como la llamaba. Dedicó casi todo el resto de su vida a demostrar la teoría de la evolución por la selección natural, buscando una base firme de la misma, estudiando sus consecuencias e implicaciones, y señalando la forma en que actuaba en la naturaleza.

Tomas R. Malthus (1776 - 1834), economista y demógrafo británico fue autor de obras de decisiva importancia en el desarrollo de la ciencia económica clásica. Su ensayo sobre el principio de la población tal como afecta a la futura mejora de la sociedad, publicado en 1798, resultó en enormes consecuencias en el desarrollo de la teoría evolucionista de Darwin (1809 - 1882), principalmente porque le inspiró la idea de la selección natural como mecanismo fundamental de la conservación de unas especies y la desaparición de otras. En el ensayo de Malthus se llamaba la atención acerca de la inexorable lucha entre los componentes de una población debido a que, mientras los recursos del medio crecían en forma aritmética, las poblaciones lo hacían en forma geométrica. De acuerdo con esto el hombre debía sufrir las consecuencias de la superpoblación: hambre y miseria. Darwin le quitó el contexto teológico original y pudo generar la idea de la lucha por la existencia, que constituye uno de los pilares de su teoría de la evolución. En lo presentado aparece la analogía establecida entre el nuevo dominio y dos dominios conocidos (selección artificial realizada por el hombre en animales domésticos y la evolución de las poblaciones sociales según la teoría de Malthus). Ambas concurren para el nacimiento de una nueva teoría en el nuevo dominio.

Se expondrán algunos fragmentos donde surge la utilización de la analogía. Expresa Darwin: “Si el hombre puede producir, y seguramente ha producido, grandes resultados con sus modos metódicos [...] de selección, ¿qué no podrá efectuar la selección natural? El hombre puede obrar sólo sobre caracteres externos y visibles. La naturaleza puede obrar sobre todos los órganos internos, sobre todos los matices de diferencia de constitución, sobre el mecanismo entero de la vida” ([05],p.105). Pretender explicar estos mecanismos internos necesita de hipótesis audaces o recurrir a hipótesis generadas a partir de analogías, tal como realizó Darwin.

El hecho de trabajar con analogías se considera brinda un determinado fundamento inicial, y esto es precisamente lo que se deja ver en las palabras de Darwin cuando al tratar el tema de Leyes de la Variación al momento de presentar un resumen expresa: “Nuestra ignorancia de las leyes de la variación es profunda. Ni en un solo caso entre cientos podemos pretender señalar una razón por la que esta o aquella parte ha variado; pero, siempre que podemos establecer alguna comparación, parece que han obrado las mismas leyes al producir las pequeñas diferencias entre variedades de una especie y las diferencias mayores entre otras especies del mismo género” ([05],p.204). Y luego expresa: “Cualquiera que fuese la causa de cada una de las ligeras diferencias entre los hijos y los padres -y tiene que existir una causa para cada una de ellas-, tenemos fundamento para creer que la continua acumulación de diferencias favorables es la que ha dado origen a todas las modificaciones más importantes de estructura en relación con los hábitos de cada especie” ([05],p.206).

La forma con la cual Darwin trabajó con las analogías se manifiestan en lo siguiente. Supuso que las leyes (si bien no las conocía) que regían en el dominio conocido conservaban su validez en el nuevo dominio: “no hay razón para que las leyes que han obrado eficazmente en estado doméstico no lo hayan hecho en estado natural” . Un aspecto más donde se ve la influencia de la analogía es en el concepto de evolución. “Como la geología claramente proclama que todos los países han sufrido grandes cambios físicos, podíamos haber esperado encontrar que los seres orgánicos han variado en estado natural del mismo modo que han variado en estado doméstico, y si ha habido alguna variabilidad en la naturaleza, sería un hecho inexplicable que la selección natural no hubiese entrado en juego. A menudo se ha afirmado esto; pero la afirmación no es susceptible de demostración, pues la intensidad de variación en estado natural es sumamente limitada. El hombre, aunque obrando sólo sobre los caracteres externos y muchas veces caprichosamente, puede producir dentro de un corto periodo de tiempo un gran resultado sumando en sus producciones domésticas simples diferencias individuales” ([5],p.613). En lo anterior tenemos un reconocimiento por parte de Darwin sobre los límites que pueden existir en el conocimiento obtenido cuando recurrimos a una analogía, al reconocer que las intensidades con las cuales se producen las variaciones son extremadamente diferentes, esto es, en la selección en estado doméstico el hombre provoca resultados en un tiempo muy corto en comparación con el tiempo que la naturaleza se toma para producir los cambios en las especies. “Si el hombre puede con paciencia seleccionar variaciones útiles para él, ¿por qué en condiciones de vida variables

y complicadas no habrán de surgir con frecuencia y ser conservadas o seleccionadas variaciones útiles a las producciones vivientes de la naturaleza? ¿Qué límite puede fijarse a esta fuerza actuando durante tiempos larguísimos y escudriñando rigurosamente toda la constitución, conformación, y costumbres de cada ser, favoreciendo lo bueno y rechazando lo malo? No sé ver límite alguno para esta fuerza al adaptar lenta y admirablemente cada forma a las mas complejas relaciones de vida. La teoría de la selección natural, aún sin ir mas lejos, parece probable en sumo grado” ([05],p.614). Existe un reconocimiento también por parte de Darwin de los peligros del empleo de este método “La analogía me llevaría a dar un paso más, o sea, a creer que todos los animales y plantas descienden de un solo prototipo, pero la analogía puede ser una guía falaz” ([5],p.632).

En favor de su teoría establecida argumentaba que “Difícilmente puede admitirse que una teoría falsa explique de un modo tan satisfactorio, como lo hace la teoría de la selección natural, las diferentes y extensas clases de hechos antes indicados” ([05],p.627). Con esto Darwin estaba suponiendo que su teoría era “verdadera” pero, como veremos mas adelante en este trabajo, puede ocurrir que siendo falsa la teoría se pueda obtener igualmente conclusiones “verdaderas”. Recibía objeciones en cuanto al método de analogía que había empleado para razonar, a lo cual respondía: “Recientemente se ha hecho la objeción de que éste es un método de razonar poco sólido; pero es un método utilizado al juzgar los hechos comunes de la vida, y ha sido utilizado muchas veces por los mas grandes filósofos naturalistas [lo que hoy denominamos físicos]. Así se ha llegado a la teoría ondulatoria de la luz, y la creencia en la rotación de la tierra sobre su eje hasta hace poco tiempo no se apoyaba casi en ninguna prueba directa. [...] ¿Quién puede explicar qué es la esencia de la atracción de la gravedad? Nadie rechaza actualmente el seguir las consecuencias que resultan de este elemento desconocido de atracción, a pesar de que Leibnitz acusó ya a Newton de introducir propiedades ocultas y milagros en la filosofía [física]” ([05],p.627).

Una característica común que se puede rescatar de estos casos es que *han tratado de asimilar el nuevo dominio* de investigación, *reconociendo algunas similitudes y suponiendo otras, con algún dominio conocido* el cual ya ha sido investigado y aceptado por la comunidad científica como que proporciona un conocimiento válido.

Puede ocurrir en este proceso que las similitudes entre lo nuevo y lo ya conocido sólo sean captadas vagamente y se preste poca atención a los límites dentro de los cuales tales semejanzas supuestas resultan válidas. Por consiguiente cuando se

extienden nociones familiares a temas nuevos sobre la base de similitudes no analizadas, se pueden cometer errores. Por ejemplo Percy Bridgman ve como dudoso el modelo del átomo que constituyeron sobre la base de la analogía con el sistema solar, ya que las escalas de longitudes involucradas son extremadamente disímiles y esto trae como consecuencia que las conclusiones, inferidas con el uso de longitudes que se obtengan con ayuda del modelo, cuya fuente es el sistema solar, puedan no ser válidas en el nuevo dominio (estructura atómica). Por ejemplo, si las longitudes en el dominio conocido responden a una geometría euclidiana, cabe preguntarse si esta misma geometría es válida cuando nos pasamos a la escala de longitudes involucradas en la estructura atómica.

Lo que nadie puede negar, es que aún la captación de pequeñas similitudes entre el nuevo dominio y algún dominio conocido *puede resultar* el punto de partida de importantes avances en el conocimiento, y esto ha quedado perfectamente expuesto históricamente con el modelo de Rutherford-Bhor, ya que de no tener nada, comparativamente, se pasó a tener un modelo que permitió realizar predicciones sobre la constitución atómica de la materia.

A través de los ejemplos dados podemos notar que las teorías relacionadas a cada ejemplo están basadas, o involucran al menos alguna referencia con *modelos y analogías*. Estos modelos fueron construidos con la ayuda de observaciones que permitieron identificar y suponer similitudes entre dominios de fenómenos familiares bien conocidos y con otros dominios extraños en un comienzo, de los cuales se poseía un conocimiento escaso, utilizándose luego estos modelos para proponer una teoría. *La analogía aparece como* un medio o herramienta para construir un modelo, con este modelo luego se argumenta utilizando las relaciones causales vigentes en el mismo con el objetivo de llegar a proponer una teoría en el nuevo dominio.

El empleo de *la analogía es reconocido como* un medio que en ciertos casos aporta un progreso significativo a la ciencia. Albert Einstein, y Leopold Infeld en su libro de divulgación *La evolución de la física* ([07],p.217) expresan: “En la física ha sucedido a menudo que el desarrollo de una analogía entre fenómenos aparentemente sin relación ha dado origen a un verdadero progreso de la misma. [...] quedaron ya consignados varios casos en que se pudo aplicar, con todo éxito, a ciertas ramas de la ciencia, ideas creadas y desarrolladas en otras ramas de ellas. La asociación de problemas no resueltos con otros resueltos puede arrojar nueva luz sobre los primeros, sugiriendo otras ideas que ayuden a solucionar las dificultades halladas. Es fácil, sin embargo, encontrar analogías

superficiales que en realidad no expresan nada, pero descubrir ciertas propiedades comunes escondidas bajo superficies exteriores de aspectos diferentes y formular, sobre esta base, una teoría nueva, constituye un trabajo de creación de gran valor”.

El argumento de esta sección puede ahora ser resumido diciendo que nosotros como humanos, con nuestras limitaciones prácticas y principios morales, debemos recurrir explícitamente en algunas ocasiones a emplear la analogía con propósitos heurísticos y con propósitos justificatorios. Lo que sostiene Mary Hesse es que el empleo de la analogía en el desarrollo de teorías está siempre presente, explícita o implícitamente, y que sin esta presencia las teorías no se pueden considerar como fuertemente predictivas. La presencia de la analogía se manifiesta a través de lo que Hesse denomina modelos analógicos.

Los Modelos Analógicos y la noción de Analogía en la obra de Mary Hesse

Los “modelos analógicos” hacen su entrada triunfal en el trabajo de Hesse cuando la misma plantea cuestiones acerca de las teorías que considera débilmente predictivas y teorías fuertemente predictivas. Esta distinción entre teorías es algo básico en el trabajo de Hesse. Una teoría es débilmente predictiva cuando es capaz sólo de predecir nuevas relaciones entre los mismos predicados de observación ya presentes y aceptados en las leyes empíricas; en un sentido estas teorías son meramente un resumen de generalizaciones empíricas. Hesse llama a ellas “teorías formales” ([11],p.38). Como ejemplo de teoría formal, como plantea Hesse, se pueden proponer algunos de los “modelos matemáticos” utilizados en economía, ellos son hipótesis diseñadas para ajustar datos experimentales para predecir nuevas relaciones entre los mismos predicados de observación. En estas teorías no existen términos teóricos.

Una teoría es fuertemente predictiva cuando puede proveer explicaciones de las leyes aceptadas y realizar predicciones de nuevos predicados de observación. Por lo tanto, las teorías fuertemente predictivas deberán contener oraciones que unan términos teóricos con términos observacionales. Lo que sostiene Hesse es que los modelos son necesariamente componente constitutivo de teorías fuertemente predictivas, porque ellos proveen una interpretación no arbitraria del vocabulario teórico. Si no existe modelo, las oraciones que hacen corresponder términos teóricos con términos observacionales tienen que ser introducidas en una manera arbitraria, y así pueden ser cambiadas en

cualquier momento cuando descubrimos alguna incompatibilidad entre las predicciones de la teoría y los fenómenos observados, la existencia de un modelo pone límites a esta arbitrariedad, lo cual quedará explicado a medida que avancemos en este trabajo.

El medio propuesto por Hesse para la construcción de modelos es la analogía, y dentro de los tipos de analogía propone lo que denomina “analogía material”, como la que permite construir “modelos analógicos” que convierten a las teorías en fuertemente predictivas. La importancia del trabajo (1966) de Mary Hesse radica en que introduce un concepto de analogía, con una fundamentada influencia sobre el desarrollo de teorías científicas. Volvamos ahora entonces sobre el concepto de analogía considerando ejemplos simples pero ilustrativos de características y diferencias. Consideremos las siguientes relaciones entre propiedades de la luz y propiedades del sonido y supongamos una etapa histórica donde se buscaba una teoría para la luz:

	Dominio Fuente	Dominio Blanco
	<i>Propiedades observables del sonido</i>	<i>Propiedades observables de la luz</i>
<i>Relaciones</i>	Conducción del sonido	
<i>Causales</i>	en medios materiales	Refracción
<i>Conocidas</i>	Ecos	Reflexión
<i>en la fuente</i>	Sonoridad	Brillo
	Tono	Color
	Propagado por aire	???

Relaciones de Similaridad

Se encuentra aquí una característica común a las analogías que serán consideradas, y es la *existencia de dos clases de relaciones diádicas*, 1) *relaciones entre propiedades de ambos dominios* que en este caso son reconocidas como similaridades, y 2) *relaciones entre propiedades de la fuente*, las cuales son en este ejemplo relaciones causales comprobadas científicamente.

En este ejemplo se detecta que las relaciones de similaridad entre términos de ambas listas pueden ser reconocidas *antes que* las relaciones entre términos de una misma lista

se conozcan, es decir las relaciones diádicas de similitud son independientes de las relaciones de causalidad.

El reconocimiento de similitudes resulta en general una tarea para nada simple, por ejemplo ¿por qué asociar “color” con tono? Recordar que nos ubicamos en una etapa histórica donde no se disponía de una teoría para la luz y sólo se observaban algunos fenómenos que la misma producía, tales como reflexión, refracción, brillo o luminosidad, donde el término “color” estaba establecido para identificar con un nombre genérico las distintas tonalidades resultantes en el fenómeno observable, producido por ejemplo cuando hacemos pasar la luz solar a través de un prisma y proyectamos la luz resultante sobre una pantalla blanca. Newton realiza una descripción de uno de sus experimentos de la siguiente manera, el cual ilustra también el sentido que se le da al término “observable”: “En el año 1666, conseguí hacer un prisma triangular de vidrio con el fin de emplearlo en el estudio del notable fenómeno de los colores. Con este fin, habiendo oscurecido mi habitación y hecho un pequeño orificio en las persianas de la ventana para dejar entrar una cantidad conveniente de luz solar, coloqué mi prisma en la proximidad de la abertura, de modo tal que la luz se refractara en el prisma, hacia la pared opuesta. Resultó desde el principio un entretenimiento muy agradable el ver así producido un haz de luz de vívidos e intensos colores” ([07],p.77).

Como sucedió con otros fenómenos físicos el estudio sistemático de la luz comienza bien avanzado el Renacimiento, y aunque aquí no se trata de hilvanar una historia se describirán algunas observaciones relacionadas con lo tratado. Curiosamente, a pesar de la multitud de fenómenos observables a simple vista, el primer paso en los estudios con la luz consistió en la construcción de dos instrumentos: el telescopio y el microscopio. Ambos aparecen casi al mismo tiempo en los primeros años del siglo XVII. En estas condiciones el escenario quedó preparado para los grandes descubrimientos astronómicos de ese siglo y del siguiente y para las primeras exploraciones del mundo hasta entonces oculto a simple vista. Durante el siglo XVII Descartes rescató en 1638 la ley de Snell de la refracción, y frente a la dispersión obtenida con un prisma comienza a surgir la célebre controversia entre Newton (1642-1727) y Huygens (1626-1695) acerca de si la luz era un fenómeno corpuscular u ondulatorio. Lo interesante del caso es que ambas interpretaciones explicaban los hechos observados del espectro solar de forma tal que era casi imposible decidirse por una de ellas.

Grimaldi (1618-1663) fue quien descubrió la *difracción* al observar la imagen obtenida haciendo incidir en un orificio muy chico un rayo de luz solar. A medida que

achicaba el orificio su imagen se iba haciendo difusa y llegaba a estar formada por franjas paralelas claras y oscuras, lineales o circulares según la forma del orificio. Esto *quedó sin explicación*, al igual que los célebres anillos observados por Newton, que son el resultado de reflexiones y refracciones en una interfase aire/vidrio. Hoy se designa este fenómeno con el nombre de interferencia en láminas delgadas. Newton había llegado al borde de la teoría ondulatoria pero no pasó de allí.

El problema quedó en suspenso por casi dos siglos durante los cuales se continuaron acumulando elementos de juicio. Fresnel (1788-1827) y Arago (1786-1853) en la segunda década del siglo XIX, utilizando luz polarizada establecieron que la luz se comporta como una onda transversal.

Lo interesante desde el punto de vista de lo que ha ocurrido con la analogía es que para el estudio del nuevo dominio de la luz se recurrió en forma independiente a dos fuentes de conocimientos ya establecidos y se lograron dos teorías que explicaban con igual eficacia distintos fenómenos observables de la luz. Por un lado Newton estableció *la teoría corpuscular de la luz* en función de proponer una analogía mecánica entre el nuevo dominio y el comportamiento de una partícula regida por las leyes del movimiento de la mecánica clásica. Por otro lado Huygens, contemporáneo de Newton, emitió una teoría completamente nueva acerca de la luz empleando analogías establecidas entre el nuevo dominio y otras fuentes distintas de la adoptada por Newton, tales como el conocimiento disponible sobre el sonido y sobre el movimiento del agua. Huygens propuso *la teoría ondulatoria de la luz*. En su tratado sobre el tema puede leerse: “Si la luz emplea cierto tiempo para recorrer una determinada distancia, resulta que este movimiento, comunicado a la materia en la cual se propaga, es sucesivo y, por consiguiente, *se difunde como el sonido*, por superficies esféricas y ondas. *Y las llamo ondas por su semejanza con las que forman sobre el agua cuando se arroja una piedra sobre su superficie*; ondas que presentan un ensanchamiento sucesivo en forma de círculos, aún cuando la causa sea distinta de la de las ondas luminosas y estén éstas en una superficie plana” (citado en [07],p.85).

Es interesante destacar que la propuesta de una analogía entre el blanco y un dominio ya conocido también aporta ideas sobre la forma de medir las nuevas propiedades que se estudian. Tomemos por ejemplo la velocidad de la luz. Sea corpúsculo u onda, la luz se propaga, por lo tanto debe hacerlo con una velocidad bien definida y en principio medible. Esto lo sospecharon los primeros observadores y Galileo intentó emplear el método que resultó útil en el caso del sonido, situando dos observadores a varios

kilómetros entre sí provistos de sendas lámparas. Los resultados fueron tan irregulares que Galileo consideró que la luz se propagaba a una velocidad muy grande como para ser medible con un procedimiento tan simple. Este es un aspecto importante que se rescata en el empleo de una analogía. Podemos destacar también que aquí la analogía se está empleando para correlacionar términos observacionales con la predicción del comportamiento de los referentes de otros términos observacionales.

Otro empleo del argumento analógico es para pasar de términos observacionales a la presentación de un término no observacional o teórico. En este caso también surge esta situación con la propuesta del éter como medio donde se propaga la luz.

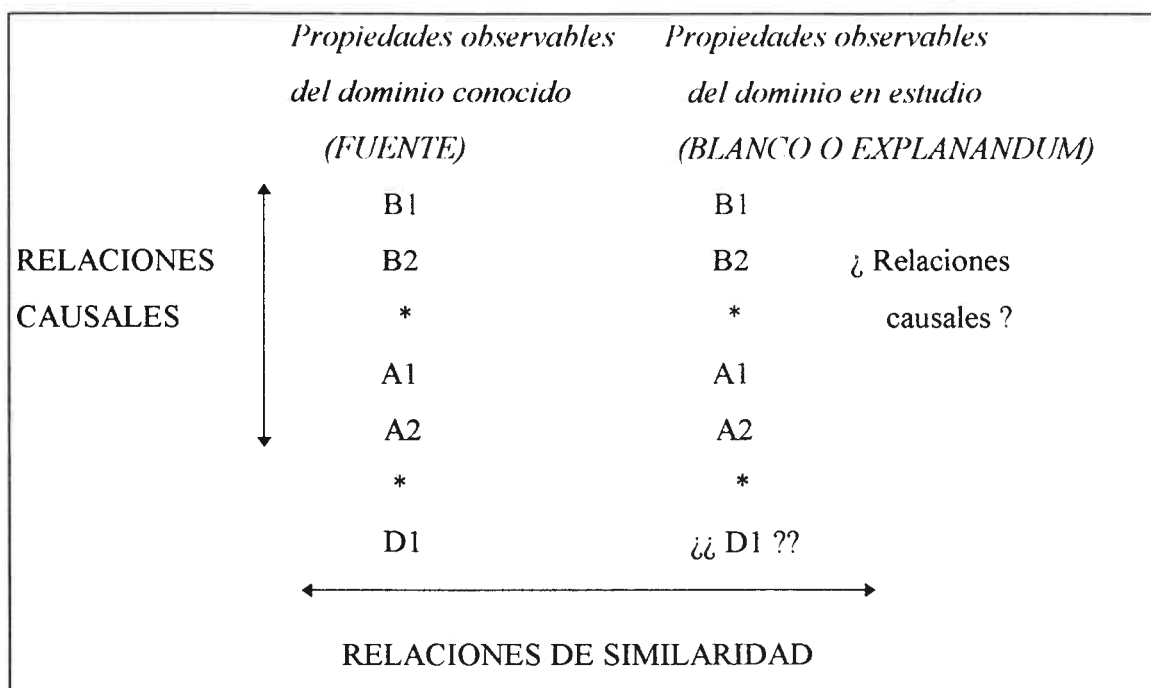
Aquí podemos ver claramente la influencia de la analogía en el desarrollo de una teoría. Para desarrollar su teoría, Huygens recurrió al sonido como una fuente que le aportara analogías que le sirvieran como herramienta heurística para comenzar a construir una teoría de la luz, y recurrió adicionalmente al movimiento generado en el agua para que le aportara significado analógico a uno de los términos teóricos que aparecían en su teoría de la luz, el término “onda”. Newton también desarrolló su teoría corpuscular de la luz sobre la base de una analogía mecánica.

Como componentes básicos en la obtención de conocimientos por analogía nos encontramos con:

- 1) El *fenómeno a explicar* (dominio blanco o explanandum), donde existen estructuras y mecanismos internos inobservables que regulan el comportamiento del mismo. Describir las estructuras y mecanismos internos que provocan este fenómeno puede ser el objetivo de la investigación. De este fenómeno se conocen propiedades observables. Con el término “*explanandum*” ([10],p.80) nos referimos al conjunto de oraciones de observación conectadas con el fenómeno que estamos intentando explicar por medio de una teoría.
- 2) las *fuentes de conocimiento*, las cuales provienen de fenómenos conocidos y fundamentados científicamente, que ayudan a construir un modelo analógico con el cual podamos describir las estructuras y mecanismos del blanco. De estos fenómenos se conocen propiedades observables y relaciones causales entre estas propiedades.
- 3) *dos conjuntos independientes de relaciones*, uno representando relaciones de similitud entre términos de ambos dominios, y un segundo conjunto representando relaciones de causalidad, entre términos de la fuente y entre términos del dominio blanco, donde las relaciones causales del dominio fuente son conocidas y las del nuevo dominio son desconocidas, total o parcialmente.

4) *grupos o conjuntos de*: Analogía Positiva (B1, B2, ..etc) - Analogía Negativa (A1, A2, ..etc) - Analogía Neutra (D1, D2, ..etc). Sobre el significado de estos grupos nos referiremos luego.

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE COMPONENTES



Al momento de clasificar analogías de acuerdo a la forma en que se las utiliza en teorías físicas, Hesse afirma que existe *analogía formal científica* entre teorías de fuente y blanco cuando ellas comparten las mismas relaciones formales, en el sentido que ambas pueden ser vistas como interpretaciones del mismo cálculo ([11],p.68). Una segunda clasificación es propuesta por Hesse denominando *analogía material* a aquellas analogías pre-teóricas entre observables las cuales habilitan a realizar predicciones desde un modelo. Sobre este tipo de analogía volveremos para presentar en forma mas detallada las condiciones necesarias para su establecimiento.

Lo que resulta característico en una analogía formal es que las relaciones de similaridad entre dominios no pueden ser identificadas sin el conocimiento previo de las relaciones causales entre términos de cada uno de los mismos. En otras palabras, las relaciones de similaridad no son independientes de las relaciones causales. Como ejemplo [ver anexo I] de analogía formal podemos poner lo siguiente. Algunas ecuaciones diferenciales desempeñan un papel fundamental en varias ramas de la física. Por ejemplo, la ecuación diferencial en derivadas parciales conocida como ecuación de Fourier, puede

ser usada para estudiar temas de la Hidrodinámica, la conducción térmica, la electricidad estática y en movimiento, y el magnetismo. El hecho que esta ecuación pueda ser utilizada en diversos fenómenos, sólo indica que los mismos manifiestan estructuras de relaciones que son abstractas o formalmente indistinguibles. Ello no significa que lo distintivo de las teorías correspondientes a cada uno de esos dominios sea expresado de manera exhaustiva por la estructura formal de la teoría. La identidad formal de teorías distintas, por supuesto, es una información importante acerca de ellas. Tal identidad permite emplear técnicas matemáticas elaboradas para un campo de investigación en muchos otros campos.

Las analogías formales pueden ser utilizadas para resolver problemas; conociendo cómo se han obtenido resultados numéricos o analíticos en un caso (por ejemplo en hidrodinámica) análogamente se puede resolver un problema en conducción térmica.

Las analogías formales prestan su utilidad en este sentido actualmente, por ejemplo, en el caso que uno posea un programa de computación que resuelva problemas hidrodinámicos empleando la ecuación mencionada y nos surja la necesidad de resolver un problema de conducción térmica en un medio sólido, entonces se puede recurrir a utilizar el programa disponible fundamentándonos en la existencia de la analogía formal, en consecuencia procedemos simplemente a establecer las relaciones de similaridad que en este caso será una correspondencia uno a uno entre términos de la ecuación y adicionalmente se establecerán otras condiciones (iniciales, de contorno) que serán típicas de cada dominio.

Las analogías formales entre teorías de disciplinas diferentes, así como las imágenes que puedan estar asociadas con el formalismo pueden ser de inmenso valor heurístico en la conducción de las investigaciones y también para realizar predicciones, pero Hesse considera que las teorías resultan débilmente predictivas y que este tipo de analogía, si bien desempeña un rol específico, no son útiles para predecir nuevas consecuencias observacionales. Las analogías formales desempeñan un rol específico y es el de sugerir nuevas ecuaciones o relaciones cuando se exploran o analizan las similaridades formales (correspondencia uno-a-uno) que existen en el dominio fuente y el dominio en estudio. Podríamos decir entonces: si ocurre que las relaciones de similaridad entre términos de ambas listas son reconocidas *después que* las relaciones causales entre términos de cada una de las listas fueron establecidas en forma independiente y estas relaciones de similaridad resultan una correspondencia uno - uno entre términos de las relaciones

causales, entonces tenemos o hemos detectado una analogía formal. Las relaciones de similitud no resultarían independientes de las relaciones causales.

Analogía material

Hesse presenta a las analogías materiales como aquellas *analogías pre-teóricas entre observables "materiales"* las cuales habilitan a que las predicciones sean hechas desde un modelo. La analogía material presupone, en primer lugar, la presencia de similitudes en un nivel *observacional* entre dos dominios de fenómenos. Estas similitudes tienen que ser pre-teóricas en el sentido de no depender de la existencia de una teoría del dominio blanco. La búsqueda de similitudes entre dominios estaría guiada por la conceptualización que se tenga del dominio familiar, o bien por la teoría involucrada en el dominio familiar o conocido.

La teoría de Hesse excluye la existencia de un conocimiento previo estructural acerca de lo que se investiga. Las similitudes "horizontales" son preteóricas: el agente análogo tiene que yacer sobre similitudes observacionales entre la fuente y el blanco. Por lo tanto, este transporte horizontal es considerado por Hesse como una pre-condición para construir una teoría "fuertemente predictiva" para el dominio del blanco.

Mary Hesse explicita condiciones ([11],p.86) para que una analogía material entre una fuente, lo que denomina un modelo² científico, y el explanandum o sector de la realidad que queremos investigar, pueda ser establecida:

Condición 1. Las relaciones diádicas horizontales entre términos deben ser relaciones de similitud a un nivel observacional, donde la similitud puede, al menos para propósitos de análisis, ser reducida a identidades y diferencias entre conjuntos de características o propiedades que forman los términos.

Condición 2. Las relaciones verticales en el modelo propuesto deben ser relaciones causales en algún sentido científico aceptable, donde no existen razones precisas *a priori* para negar que relaciones causales del mismo tipo puedan mantenerse entre términos del explanandum.

Condición 3. Las propiedades esenciales y las relaciones causales del modelo que sea propuesto no tienen que formar parte de la analogía negativa entre fuente y explanandum.

Aclararemos que hasta el momento no hemos definido ni considerado la forma de establecer un modelo. Lo que podríamos objetar a Hesse en el establecimiento de las

condiciones es que no explicita el hecho de que la identificación o suposición de las relaciones de similaridad deben ser preteóricas.

Hesse considera que decir en qué consiste la analogía es dejar establecido tres grupos denominados analogía neutra, negativa y positiva. El hecho que las relaciones “horizontales” en una analogía material sean similaridades observables, permite establecer el agrupamiento de las propiedades consideradas para fuente y explanandum en estos tres grupos. Un primer grupo se compone de todos aquellos aspectos o propiedades en que tanto fuente y explanandum acuerdan, Hesse lo denomina “analogía positiva”. Un segundo grupo formado por el conjunto de características en que desacuerdan o no presentan similaridad, constituye la analogía negativa. Por último un tercer grupo con propiedades de fuente y explanandum de las cuales hasta el presente momento de la investigación no se poseen elementos de juicio como para decir que son analogía positiva o analogía negativa, se denomina analogía neutra. A este grupo de analogía neutra se le otorga un rol importante como elemento que permite que la teoría para el nuevo dominio, generada por medio de razonar con analogías materiales, posea un carácter dinámico. La teoría una vez formulada puede no permanecer en el tiempo con la misma estructura formal propuesta sino que, al estar basada sobre una analogía material que posee un conjunto de propiedades que no se sabe si van a constituir analogías positivas o analogías negativas, entonces puede llegar un tiempo en donde uno posea los elementos para decidir esta cuestión y en consecuencia la nueva composición de los grupos analógicos puede producir cambios de la teoría previamente establecida sobre el explanandum.

Hesse considera que las propiedades interesantes son las que constituyen la analogía neutra, porque ellas son las que nos permiten realizar nuevas predicciones. También la analogía neutra desempeña un rol en la formación de conceptos al aportar significado analógico a los mismos. Considerando la ventaja predictiva que Hesse afirma puede aportar una analogía material comparada con una analogía formal, consideraremos con más detalle la primera de estas analogías.

Razonamiento analógico basado en analogía material

Algo que se puede afirmar es la habilidad que poseen las personas para comprender fácilmente nuevas situaciones por analogía a situaciones ya conocidas, y también para resolver problemas nuevos, por analogía, tomando como base problemas previamente

resueltos. Lo anterior puede ser considerado como habilidades del razonamiento analógico y posiblemente han contribuido a que el empleo de este tipo de razonamiento no haya desaparecido totalmente de la práctica científica a pesar de haber sido considerado generalmente como un tipo de argumento débilmente justificado en su empleo. Con el trabajo de Mary Hesse el aspecto de fundamento en el empleo de este tipo de razonamiento se ve revertido. Adaptado del marco establecido por Hesse sobre razonamiento analógico ([12],p.319), el *razonamiento analógico* basado en una analogía material presentaría las siguientes *características*:

- (a) algunas conexiones de similitudes y diferencias de atributos materiales, entre fuente y blanco, estado inicial y propósito,
- (b) algún criterio para elegir cuáles similitudes debemos transportar para proveer la solución,
- (c) el criterio específico sobre el tipo de acción exitosa y/o inferencia que en el nuevo dominio es requerida.

Para el fundamento de la inferencia analógica basada en analogía material, Hesse propone una *hipótesis de agrupamiento* (Clustering hypothesis) la cual captura lo que se necesita asumir para una inferencia científica de este tipo: (H) “Cada combinación lógicamente posible de objetos naturales y propiedades (observables e inobservables) no son igualmente probables” ([12],p.326).

Con esta hipótesis uno puede dar un fundamento a la búsqueda de similitudes entre dos dominios de fenómenos, uno conocido y el otro incógnita, del cual sólo conocemos algunas propiedades observables. Su justificación puede ser presentada en el siguiente tipo de argumento:

- (i) no todas las combinaciones de objetos y propiedades son inicialmente igualmente probables,
- (ii) los objetos caen en grupos determinados por una relación de proximidad,
- (iii) la probabilidad inicial que nuevos objetos y sus propiedades sean agrupadas como objetos ya conocidos es mayor que la probabilidad que no lo sean.

El surgimiento del modelo analógico

Hasta el momento se consideró la propuesta de analogía material y se analizaron y representaron distintos componentes que intervienen en la misma. Ahora bien, todos estos componentes pueden aspirar a cumplir un objetivo importante, y es el de contribuir

a desarrollar una teoría para el explanandum. Para ello es necesario realizar razonamientos válidos que permitan, a partir de determinadas proposiciones iniciales lograr inferir o deducir otras. En este caso el razonamiento es analógico y para poder iniciarlo es necesario proceder a identificar o proponer un “modelo analógico”. El funcionamiento del modelo analógico estará regido por las relaciones causales de la fuente y este funcionamiento será el que guíe la formulación de la teoría en el dominio blanco. Entonces, el establecimiento de una analogía permite proponer modelos analógicos. El modelo está regido por relaciones causales y las relaciones de similaridad identificadas y supuestas entre los dominios sirven de nexos para probar la teoría del modelo como una teoría para el explanandum.

Considerando la analogía material se pueden construir dos tipos de modelos; los que Hesse denomina *modelo1* y *modelo2*. El *modelo1* es formado sobre la base de los conjuntos de analogía positiva y analogía neutra. El *modelo2* incluye los tres conjuntos de analogías, es decir que el *modelo2* se estaría confundiendo con la fuente misma.

Un modelo para el nuevo dominio (*modelo1*) es construido desde la teoría del dominio fuente (*modelo2*) por la eliminación (abstracción) de la analogía negativa conocida. Una vez establecido el *modelo1* podemos realizar un razonamiento analógico utilizando las relaciones causales conocidas y válidas en el modelo junto a los nexos de similaridad con el fin de probar la teoría del *modelo1* como una teoría para el explanandum. Por ejemplo si proponemos como nuevo dominio lo referente al sonido, y como dominio conocido las ondas de agua, una vez establecidas las correspondencias entre propiedades observables del sonido y aquellas de las ondas de agua, podemos estar en una posición de probar la teoría matemática de ondas de agua como una teoría del sonido. La puesta a prueba de las consecuencias observacionales nos dirán si la teoría propuesta es satisfactoria o no.

Modelos analógicos para un nuevo dominio son siempre el resultado de algún tipo de abstracción o idealización. En un modelo analógico material se elimina la analogía negativa. Así surgen teorías desarrolladas por argumentos desde sistemas análogos o modelos analógicos.

El contexto de descubrimiento de una teoría.

En el *contexto de descubrimiento de una teoría* podemos disponer de tres maneras de aportar hipótesis. Una forma es emplear el método de *inducción por enumeración*, el

cual aporta hipótesis a un nivel empírico pero no a un nivel teórico. Otra forma es a través de lo que se denomina un *salto creativo*, que no tiene explicaciones algorítmicas y que simplemente consiste en rubricar hipótesis que expliquen el punto de partida y que por lo tanto luego puedan ser puestas a prueba en el contexto de justificación. La tercera forma es aportar hipótesis mediante algún tipo de algoritmo *analógico*, que es el que está proponiendo Mary Hesse.

Con la teoría del salto creativo, directamente se conjeturan hipótesis teóricas que, no son cualesquiera puesto que se las propone porque explican el hecho de partida y así puedan ser supuestas como hipótesis de trabajo verdaderas. Luego se pondrán a prueba en el proceso del contexto de justificación. En el método hipotético-deductivo el descubrimiento es un salto creativo, es una búsqueda de conjeturas e hipótesis que expliquen lo empírico. Otra manera es la inducción por enumeración que se queda a mitad de camino pues no puede pasar de leyes empíricas generalizadas y la otra manera es la inducción dentro de un esquema analógico que permite llegar a postular entidades teóricas por la metodología de los modelos.

Consideremos la base empírica y la zona teórica. Pretender descubrir una teoría implica partir de cierta problemática surgida en la base empírica y que queremos explicar. Los inductivistas antiguos creían que por inducción, mediante un algoritmo, iban a llegar a elaborar la teoría que luego pondrían a prueba deductivamente poniendo a prueba las consecuencias observacionales que a su vez servirían para confirmar la teoría. Esa inducción por enumeración no resultó porque solamente podemos llegar hasta leyes empíricas, quedándose en un nivel intermedio entre la base empírica y la zona teórica ya que por inducción enumerativa no pueden surgir términos teóricos.

A la inducción dentro de un esquema analógico se la suele llamar *inducción en un sentido amplio* por la razón que expondremos a continuación. El método analógico, como el método inductivo por enumeración, tiene sus mecanismos casi algorítmicos en el contexto de descubrimiento. Tanto el inductivo como el método analógico se presentan como métodos generadores de hipótesis. El hipotético-deductivo en cambio nos dice que no hay método de generar hipótesis.

Utilizar modelos analógicos permite pasar de la base empírica a la zona teórica con la ventaja de que permite descubrir entidades teóricas. No sabemos que lo que se propone sea verdadero, también es una conjetura. En ese sentido se dice que el método de los modelos analógicos es inductivo, no es deductivo, no podemos a partir de la observación, por el método de modelos, deducir la teoría. Simplemente se conjetura la

teoría a partir de un mecanismo que no transmite la verdad de la base empírica a la zona teórica, en ese sentido es inductivo, porque la inducción nunca transmite la verdad de manera segura como sí la transmite la deducción. En ese sentido se considera que todo método que no transmite la verdad pero que permite conjeturar con cierta garantía algo, es inductivo y si adicionalmente nos permite proponer términos teóricos, lo llamamos inducción en un sentido amplio.

El método de Mary Hesse aporta conjeturas que no sólo explican lo que ocurre en la base empírica, que contiene nuestra problemática de partida, sino que además puede llegar a la zona teórica no por simple salto creativo sino por una metodología que es la metodología de los modelos analógicos.

La participación e influencia del modelo analógico en el contexto de descubrimiento y desarrollo de una teoría.

Pasemos ahora a considerar la analogía material presente en el ejemplo:

	<i>Fuente</i>	<i>Explanandum</i>
	<i>Propiedades del sonido</i>	<i>Propiedades de la luz</i>
	Conducción del	
	sonido en materiales	Refracción
<i>Relaciones</i>	Ecos	Reflexión
<i>causales</i>	Sonoridad	Brillo
	Tono	Color
	Propagado por aire	???
	<i>Relaciones de Similaridad</i>	

En este ejemplo simple encontramos que, en principio las condiciones 1 y 2 para establecer una analogía material se cumplen. Con un modelo propuesto sobre la base de la analogía positiva y de la analogía neutra podemos: primero, inferir desde términos observacionales el comportamiento de otro predicado observable. Por ejemplo, similitudes conocidas entre propiedades de reflexión, refracción e intensidad y sus correlatos de sonido puede conducir a una predicción que considere al “color” a partir de las propiedades que involucran frecuencia. Segundo, también se podría estar estableciendo analogías materiales que involucran al menos un término ausente, en este caso el uso que se le está dando a la analogía material establecida es para pasar,

argumentando por medio de un modelo, de propiedades observables a la presentación de un término teórico, y por lo tanto a hipótesis acerca del mismo; este término pasa a ocupar un lugar faltante en el correlato de alguna propiedad conocida. Para Hesse, este uso de la analogía material en conexión con modelos científicos otorga significado a los términos teóricos ([11],p.93).

Por ejemplo, aire en el caso del sonido no presenta una propiedad asociada a la otra lista. En tal caso una propiedad puede ser inventada, por ejemplo el “éter” no fue observado como el correspondiente correlato de aire, sino simplemente *fue postulado* a ocupar el lugar de un correlato faltante entre las propiedades asociadas a la luz. El éter era una entidad designada por un término teórico que fue inventado por necesidad, que fue asociado al “observable” aire. Acordemos que el significado de “observable” se está tomando en un sentido amplio, el cual incluye la observación indirecta por medio de instrumentos y teorías que influyen en la observación. Lo interesante de esta invención es que luego se la utilizó *como si se comportara físicamente como su simil material , atribuyéndole propiedades de un medio continuo*, por ejemplo densidad, elasticidad, viscosidad (en algunos casos se suponía que se comportaba como un medio gelatinoso). Esto solamente es posible si están dadas las condiciones de una analogía material y se establece la analogía como tal. Lo decimos porque en una analogía de este tipo, en donde uno de los términos es teórico, si se conoce una teoría de ondas entonces también es posible interpretarla como analogía formal, es decir, términos relacionados por similitud pueden ser considerados como interpretaciones del mismo símbolo o conjunto de símbolos, en este caso de la teoría de ondas. Esto, sin embargo, nada nos aportaría acerca de los términos teóricos introducidos excepto que ellos son tales interpretaciones, el término teórico introducido no adquiere un significado preciso cuando es identificado por medio de una analogía formal.

En cambio, si se establece una analogía material en el sentido definido entonces tenemos la posibilidad de incorporar el grupo de analogía neutra para realizar un modelo con el cual argumentar acerca del término teórico como fue ejemplificado con el término “éter”, aportando de esta manera un significado analógico al mismo. También vimos anteriormente, que el dominio fuente aporta ideas para realizar mediciones sobre el término que se presenta.

¿Qué condiciones se requerirían para postular un término teórico? Quedarían resumidas cuando Hesse afirma que “Un argumento analógico desde modelos puede conducir al descubrimiento de causas inobservables o a la postulación de entidades

teóricas, pero las similitudes desde las cuales comienza deberán ser observables” ([11],p.79). En este sentido, Hesse expresa que un argumento analógico basado en analogía material aporta un significado a los términos teóricos que se presentan. El significado dado al término teórico ‘éter’ es un significado analógico aportado por la similitud postulada con la analogía neutral del dominio fuente. Hesse entonces, propone y muestra cómo un argumento basado en analogía material otorga significado a los términos teóricos.

Resumiendo, se destaca el rol del razonamiento analógico en la formación de conceptos, considerando que el razonamiento analógico es un método clave en la construcción de conceptos científicos, y Hesse sugiere que “Los modelos nos habilitan a realizar predicciones porque conducen a nuevas y obvias interpretaciones de algunos términos teóricos, las cuales pueden entonces ser utilizadas para derivar nuevas relaciones entre observables” ([11],p.35).

Consideraremos una teoría fuertemente predictiva, al igual que Hesse, como aquella que fue generada por medio de un razonamiento analógico válido que tiene en cuenta los grupos de analogía positiva y la analogía neutra, esto es, basada sobre un modelo1, donde la presencia del conjunto de analogía neutra es el que le otorga a la teoría un carácter dinámico en su evolución. El modelo1 puede proveer nuevos conceptos, esquemas conceptuales y proponer nuevas hipótesis acerca del fenómeno en estudio a través de la exploración de la analogía neutra. Existen teorías que se basan en modelos formados solamente por el grupo de la analogía positiva, cuando este es el caso dichas teorías no tienen posibilidad de evolucionar, favorable o desfavorablemente, a través del tiempo.

¿Qué ocurre con la analogía negativa? La analogía negativa queda incorporada o se mantiene en lo que Hesse denomina modelo2, que es un modelo que tiene en cuenta las analogías positiva, negativa y neutra. La analogía negativa sirve para decidir si una teoría basada sobre un modelo1 se puede seguir manteniendo o no. Por ejemplo, si propiedades esenciales y relaciones causales de un modelo1 se comprueba que de alguna manera están involucradas con la analogía negativa, entonces es muy probable que tengamos que abandonar este modelo.

Tomemos ahora dos casos históricos que pueden ser considerados como basados en una analogía material y que muestran la manera como intervienen los distintos grupos de analogía y su influencia en el desarrollo de una teoría. Comencemos con el primer caso. Cuando se comenzó a estudiar el dominio físico involucrado con la conducción de calor

se recurrió a un dominio familiar como lo era el de la sustancia o fluido líquido. En el dominio conocido o familiar de la hidráulica se tenían ciertos conocimientos hidrodinámicos de que el líquido: a) es una sustancia con peso, b) cumple con la conservación de la masa, c) se pone en movimiento cuando existe una diferencia de nivel en el terreno como consecuencia de la existencia de un campo gravitacional. En el dominio blanco para el calor se suponía que: a*) es una sustancia con peso, b*) es una sustancia que se conserva, y se conocía que, c*) fluye cuando existe una diferencia de temperatura.

De la identificación y suposición de similaridades se propusieron teorías para el fenómeno “observable” de conducción del calor, basada en el modelo de fluido.

Los descubrimientos experimentales de Black concernientes al calor fueron sugeridos por su concepción del calor como un fluido, y la teoría de Fourier acerca de la conducción térmica fue concebida en analogía con las conocidas leyes del flujo de los líquidos ([20],p.110). Siméon - Denis Poisson (1781-1840), en particular desarrolló teorías matemáticas de calor y electricidad (electrostática). Una derivación de las ecuaciones de conducción de calor utiliza un modelo explícito de las relaciones entre moléculas ponderables y “fluido calórico” en un sólido. Poisson obtuvo por rigurosos y laboriosos métodos matemáticos la ecuación general para el movimiento del calor. Joseph Fourier (1768-1830) trató la conducción de calor como si fuese un fenómeno de “flujo continuo”, sin considerar su verdadera naturaleza física. Para el estudio no recurrió a modelos microscópicos, sino que su teoría de calor fue esencialmente macroscópica, geométrica y práctica ([27],p.327).

Podemos decir que la analogía que intervino en la construcción del modelo fluido puede ser considerada como una analogía material ya que las similaridades se buscaron entre caracteres observables y materiales (condición1), y las relaciones verticales en la fuente eran relaciones causales científicamente aceptadas (condición 2)..

Del modelo de fluido calórico se tenía conocimiento de alguna *analogía positiva* como la establecida como la causa de su circulación por diferencia de temperatura, y también poco tiempo después se tuvo conocimiento de una *analogía negativa* como que el calor, a diferencia del líquido, era una sustancia sin peso. Esta analogía negativa no hizo que el modelo de fluido calórico se dejara de usar.

Se disponía también de una *analogía neutra*, que era la hipótesis que se mantenía sobre la conservación de la sustancia calor. No se tuvo conocimiento durante un

determinado número de años si esta propiedad iba a resultar en una analogía positiva o negativa *¿Cómo se procedió con esta analogía neutra?* Consideremos el segundo caso.

Un ejemplo histórico muy interesante se encuentra en el desarrollo de la Teoría de Ciclo Ideal de Funcionamiento para Máquinas Térmicas propuesta por Nicolás Leonard Sadi Carnot, en el año 1824, y que utiliza la teoría del fluido calórico. Esta teoría de Carnot tenía entre una de sus hipótesis la siguiente: el calor puede producir trabajo sin destruirse, esto es, se considera como una sustancia indestructible, a condición de experimentar una caída de temperatura. A pesar de ser una hipótesis falsa que el calor es una sustancia que se conserva como fue demostrado con las experiencias de James Prescott Joule en 1843 ([27],p.326), las cuales pusieron de manifiesto que el calor no es una sustancia, lo sorprendente fue que los resultados que se obtuvieron con la teoría de Carnot fueron resultados concretos y cuantitativos directamente corroborados por la experiencia.

Carnot estableció la producción de trabajo en máquinas térmicas cíclicas aceptando como punto de partida la teoría del fluido calórico y su hipótesis fundamental: la conservación del calor. Estableció con similitudes, entre un líquido y el calor como si fuese una sustancia, una analogía entre una máquina que funcionaba con vapor y la rueda hidráulica que era utilizada en esa época con buen éxito en distintas tareas industriales.

El dominio conocido, práctica y teóricamente, lo formaba la rueda hidráulica de uso industrial, en este dominio se conocía que: a) existía un desnivel del terreno que causaba el movimiento del agua, este desnivel se podía medir, b) la cantidad de trabajo por unidad de tiempo producida dependía de la cantidad de líquido y del desnivel, este trabajo se podía medir en el eje de la rueda, c) se observaba que el líquido que caía desde una cierta altura y pasaba a través de la rueda, realizaba trabajo útil y caía a un nivel inferior del terreno; en ese punto si uno recolectaba el líquido impulsándolo con la rueda hidráulica ahora girando en sentido contrario, se observaba que prácticamente el mismo trabajo que se había producido se requería para que el líquido retornara a su altura original. Se decía que la rueda hidráulica funcionaba como una máquina reversible.

En el dominio blanco de estudio, máquina térmica que funcionaba con vapor, se conocía que: a*) existían diferentes temperaturas en el recorrido del fluido calórico, b*) la cantidad de trabajo por unidad de tiempo dependía de la cantidad de fluido calórico y del desnivel o diferencia de temperaturas, donde este trabajo producido se podía medir en el eje de la máquina, c*) para la máquina térmica se supuso que lo que se observaba en la rueda hidráulica, también resultaba similar en la máquina térmica, con lo cual se

postulaba la reversibilidad de la máquina térmica. Carnot identificó y postuló, entre otras, las siguientes similitudes:

	FUENTE	EXPLANANDUM
1	Desnivel en el terreno	Desnivel de temperatura
2	Movimiento de líquido	Flujo de calor
3	Cantidad de sustancia líquida	Cantidad de sustancia calórica
4	Trabajo disponible en el eje de la rueda	Trabajo disponible en el eje de la máquina de vapor
5	La rueda hidráulica funcionaba como una máquina reversible	???

Relaciones de similitud

Se puede afirmar que la analogía que estableció Carnot se corresponde con lo que Hesse llama analogía material, ya que trabajó con similitudes surgidas desde un nivel observacional y preteóricas. Si bien se disponía de la teoría de fluido calórico que ya era conocida, en cambio no se disponía de una teoría general en el dominio en estudio que influenciara la identificación y suposición de todas las similitudes. Las relaciones verticales en el dominio familiar eran relaciones causales bien establecidas por la ciencia de la hidrodinámica que en esa época estaba muy bien desarrollada, incluso su padre había escrito un libro donde trataba sobre el funcionamiento de máquinas hidráulicas. Sadi Carnot para desarrollar su teoría identificó similitudes, por ejemplo 1 - 2 - 3 y 4, y supuso otras, en este caso supuso que el funcionamiento de una máquina térmica iba a resultar reversible al igual que la máquina hidráulica.

Con estas similitudes estableció una analogía, que puede ser correspondida con una analogía material, y el "modelo" basado en esta analogía material fue "la rueda hidráulica". Este modelo analizado desde el punto de vista de composición de grupos analógicos podemos afirmar que contenía un grupo de analogía positiva, 1 - 2 - 3 y 4, y un grupo de analogía neutra, formado por la similitud supuesta para el funcionamiento reversible y la similitud supuesta para la conservación de la sustancia. Con el modelo hidráulico establecido Carnot argumentaba que el trabajo realizado por una máquina térmica resultaba del paso del fluido calórico a través de una diferencia de temperaturas, del mismo modo como el trabajo realizado por una rueda hidráulica resultaba del paso del agua a través de una diferencia de alturas del terreno donde se producía la caída del agua. Las leyes conocidas que reflejaban el comportamiento causal del modelo (rueda

hidráulica) se emplearon para desarrollar la teoría en el dominio blanco. Carnot, con estas analogías y con la ayuda de las relaciones ya conocidas en el nuevo dominio (se conocían distintos procesos termodinámicos), logró idear una determinada secuencia que tenía que cumplir una máquina térmica, de tal forma que siguiendo esta secuencia o ciclo ideal la máquina resultaba ser reversible.

En este caso histórico se ejemplifica la función aportada por la analogía neutra, ya que su estado de “incógnita” en un determinado estado de desarrollo de la ciencia, permite utilizarla como una hipótesis de trabajo y donde los resultados que se obtengan por el hecho de suponerla verdadera, en un sentido lógico, recibirán una corroboración o refutación por las experiencias que se realicen. Si las experiencias corroboran los resultados entonces se la sigue manteniendo hasta tanto surjan otros hechos experimentales que expresen la refutación de tal hipótesis como ocurrió luego con los trabajos de Joule sobre la conversión de trabajo mecánico en calor que dieron la indicación que el calor no es una sustancia indestructible, ya que en estas experiencias se lo estaba generando a partir del trabajo mecánico que realizaban unas paletas girando dentro de un recipiente que contenía líquido, luego de haber realizado un determinado trabajo se comprobaba una elevación de la temperatura del líquido, lo cual ponía en evidencia la existencia del flujo de calor.

Una analogía neutra contenía la hipótesis de conservación del calor. Esta resultó luego ser falsa pasando entonces a ser un miembro de la analogía negativa. La propiedad de conservación resulta esencial para esta teoría. En este caso histórico, lo que se abandonó fue la teoría del fluido calórico, pero no la del ciclo ideal de funcionamiento para este tipo de máquinas. Un aspecto muy importante que surge de la aplicación o utilización de esta analogía neutra, a pesar de que luego se demostrara que era una analogía negativa, es que le permitió introducir una noción o concepto termodinámico fundamental, como lo es el de reversibilidad en las máquinas térmicas. Lo que consiguió Carnot con su modelo hidráulico es describir los mecanismos involucrados en el funcionamiento ideal de una máquina térmica.

El origen del desarrollo de esta teoría estuvo centrada en aspectos económicos. Carnot (1796-1832) estaba impresionado por la economía de combustible que producían unas máquinas de vapor inventadas por Wolff, y entonces trató de explicar esta relativa economía y ver hasta qué punto se podrían seguir realizando mejoras en las máquinas térmicas que disminuyeran aún más el consumo. Con su teoría la respuesta que dio es que la potencia motriz (cantidad de trabajo por cada unidad de tiempo) producida por las

máquinas térmicas dependía solamente de las diferencias de temperaturas entre una fuente caliente (caldera) y una fuente fría (condensador) y no dependía de la sustancia de trabajo empleada (vapor, aire, etc). En otras palabras, a mayor diferencia de temperaturas, mayor era la cantidad de trabajo producido para una misma cantidad de sustancia calórica. Carnot razonaba que ninguna máquina térmica podría ser más eficiente que una perfectamente reversible en la cual la potencia motriz producida por una dada cantidad de fluido calórico cayendo entre dos temperaturas podría ser empleado para elevar la misma cantidad de calor a su temperatura original. La violación de este principio produciría trabajo de la nada. Carnot por lo tanto estableció un límite teórico a las posibles mejoras de las máquinas térmicas operando entre temperaturas fijas.

En el caso mencionado, la teoría del fluido calórico, tenemos aquí un caso de *modelos asociados con falsas teorías*. El *modelo fluido* fue primero sugerido a causa de alguna analogía positiva entre el movimiento fluido y conducción de calor. Fue posteriormente conocida alguna analogía negativa, por ejemplo el fluido calor no presentaba peso. Esta analogía negativa no hizo, sin embargo, prevenir que el modelo fluido continuara siendo un aceptable modelo² para el calor. Pero subsecuentes investigaciones de la analogía neutra mostraron que otras propiedades de fluidos podrían no poseer sus correlatos correctos de calor, por ejemplo, el fluido calor no se conservaba. Ahora en este punto una decisión considerando la continuación de la aceptabilidad del modelo tiene que reposar sobre una decisión acerca de la importancia, respecto al modelo, de la propiedad de conservación. Si la conservación no es una propiedad “esencial” de los fluidos, la misma puede ser relegada a la analogía negativa en la comparación con el calor y el resto del modelo¹ fluido-calor es retenido, como sucedió con la propiedad peso. Pero si la conservación es juzgada esencial al modelo² fluido, esta analogía negativa será tomada como suficiente para refutar o dejar de lado el modelo fluido-calor, y la teoría de fluido calórico será considerada falsa. La respuesta a la cuestión de cuándo una propiedad es esencial a un modelo no presenta una respuesta de corte claro.

Para el caso de la teoría de Carnot sobre el funcionamiento ideal de las máquinas térmicas, la conservación del fluido constituía una propiedad esencial en el modelo hidráulico (rueda hidráulica). Era esencial porque permitía obtener el propósito u objetivo de la investigación que era el estudio de la reversibilidad de funcionamiento.

En este caso, de haberse conocido en esa etapa histórica (1824), que el fluido calórico no se conservaba, entonces posiblemente Sadi Carnot no hubiese intentado recurrir a la

teoría del fluido calorico, pero esto no sucedió así felizmente. Decimos felizmente porque los resultados teóricos y prácticos obtenidos fueron muy importantes, ya que dejó establecido límites teóricos para el funcionamiento de las máquinas térmicas.

Ahora bien, aquí cabe preguntarse lo siguiente: ¿cómo pudo obtener resultados correctos partiendo de una hipótesis que fue demostrada falsa? Si se considera un razonamiento basado en las dos siguientes premisas. *Primer premisa:* de la teoría del ciclo ideal de las máquinas térmicas basada en el modelo analógico de la rueda hidráulica se deducen consecuencias observacionales, *segunda premisa:* realizadas las experiencias esas consecuencias observacionales son observadas, y considerando que la teoría fue mantenida sin modificaciones por un tiempo, podemos suponer como *conclusión* que la teoría del ciclo ideal de funcionamiento de máquinas térmicas basada en ese modelo era considerada verdadera; el esquema lógico de este razonamiento es

premisa 1	si P entonces Q
premisa 2	Q
luego	P

donde Q representa las consecuencias observacionales. Se puede demostrar que el mismo es un razonamiento inválido, llamado falacia de afirmación del consecuente, ya que partiendo de premisas verdaderas se puede obtener una conclusión falsa, por lo tanto no se puede afirmar nada respecto al valor de verdad de la oración P, y en este sentido una analogía demostrada negativa años después (1843) pudo ser mantenida sin objeciones, ya que lógicamente no estamos en condiciones de descartarla; permanece en un estado de hipótesis formando parte del grupo de analogía neutra.

Hesse considera que los modelos asociados con falsas teorías pueden satisfacer las primeras dos condiciones establecidas para una analogía material, y aún ellos no constituir modelos en el sentido requerido para la predicción, y que en orden a excluirlos la tercera condición ya enunciada es requerida. Esta es (3) “Las propiedades esenciales y relaciones causales del modelo no tienen que formar parte de la analogía negativa entre modelo y explanandum” ([11],p.91). Sobre este punto históricamente parece haber ocurrido lo contrario.

En función de los ejemplos dados analicemos la afirmación de Hesse “mis modelos me habilitan a realizar predicciones porque conducen a nuevas y obvias interpretaciones de algunos términos teóricos, las cuales pueden entonces ser usadas para derivar nuevas relaciones entre observables” ([11],p.35). Los ejemplos tratados están involucrando el empleo del término teórico “calor”.

Históricamente encontramos que la entidad teórica “calor”, de la cual se conocían distintos efectos observables tales como conducción, ebullición, etc, se le asoció un *modelo fluido* al encontrarse una similaridad tal como que el calor se trasladaba de un lado a otro cuando existía una diferencias de temperaturas al igual que un líquido lo hacía cuando existía una diferencia de alturas y estaba el líquido sometido a la acción de la gravedad. De esta manera se supuso que también otras similaridades se cumplían, como la del peso de la sustancia y la propiedad de conservación de la sustancia. De esta manera la interpretación que recibió en un primer momento el término teórico “calor” fue:

Interpretación 1: “El calor es una sustancia con peso, indestructible, y que se pone en movimiento cuando existe una diferencia de temperaturas”.

Al conocerse después que el calor era una “sustancia” sin peso, ya que si se pesaba una barra metálica estando fría y luego se la pesaba nuevamente estando caliente, se encontraba que sus pesos eran idénticos; la interpretación del término calor había cambiado, ahora se tenía:

Interpretación 2: “El calor es una sustancia imponderable, indestructible, y que se pone en movimiento cuando existe una diferencia de temperaturas”.

Este modelo de fluido para el calor fue útil para proponer “teorías de conducción del calor” (Poisson, Fourier), que explicaban hechos como el siguiente: “*La temperatura disminuye a lo largo del recorrido que realiza el calor, en condiciones independientes del tiempo*”.

Existían otros hechos en el dominio práctico de la utilización del calor que las teorías de conducción no podían predecir ni explicar. Oraciones (que denominaremos P) tales como:

P1- “El calor produce trabajo cuando existe una diferencia de temperaturas y están dadas ciertas condiciones, como se podía inferir en una máquina de vapor”.

P2- “A una mayor diferencia de temperatura, se consigue obtener un mayor trabajo con estas máquinas térmicas”.

P3- “A una mayor cantidad de calor corresponde una mayor cantidad de trabajo producido”.

Salvo P2 las demás oraciones no son empíricas (observacionales) porque contienen el término “calor” que no es observacional.

Se podría suponer que estas dos últimas oraciones (P2, P3) podían ser obtenidas de la primera P1 si una teoría estuviese establecida. Lo cierto es que de la teoría de conducción del calor, con el término interpretado según la segunda forma presentada,

no se podían deducir ya que el “trabajo” no aparecía en dicha teoría, por lo tanto no podía aparecer en las conclusiones de una deducción.

Según Hesse es la presencia del modelo la que contribuye a realizar el puente para derivar relaciones entre nuevos observables. En este caso esto fue precisamente lo que ocurrió con el modelo fluido para el calor como se puede extraer del desarrollo de los ejemplos dados. En el dominio familiar del fluido líquido se observaba que un líquido cuando cae desde una cierta altura y pasa a través de una rueda hidráulica entonces produce trabajo. En el dominio familiar existía una observación similar como ya hemos mencionado y señalado como P1. Esto determinó que una nueva similaridad se propusiera como nexo de unión entre un dominio poco conocido teóricamente y con buenos resultados prácticos hasta ese entonces, con un dominio bien conocido tanto en forma teórica como práctica. Esto condujo a que se propusiera una hipótesis como la realizada por Carnot (1824): “El calor puede producir trabajo sin destruirse a condición de experimentar una caída de temperatura desde un depósito de calor a alta temperatura (caldera) hacia un depósito de calor a baja temperatura (condensador)”.

De esta manera, el modelo fluido estaba ampliando la interpretación que se le daba al término teórico “calor”, y *con esta nueva interpretación se estaba contribuyendo a predecir y explicar nuevas relaciones entre nuevos predicados observables*, por ejemplo, con esta hipótesis se podrían explicar las oraciones P2 y P3, y donde la oración P1 sirvió para detectar una similaridad con el modelo fluido, que permitió que el concepto teórico calor tomara una nueva interpretación, tal como:

Interpretación 3: “El calor es una sustancia imponderable, indestructible, que se pone en movimiento cuando existe una diferencia de temperaturas, y que puede producir trabajo sin destruirse a condición de experimentar una caída de temperatura”.

Por el desarrollo histórico que tuvo el dominio relacionado al calor, sabemos que existieron otros hechos adicionales que hicieron cambiar esta concepción del término teórico calor. Carnot ya había reconocido entre 1824 y 1826 que un trabajo no podía ser producido sin la “destrucción” de una cierta cantidad de calor, y también a la inversa; claramente se estaba reconociendo que el calor no era una sustancia indestructible. Esta suposición recibió su corroboración con las experiencias llevadas a cabo por Joule en 1843 en las cuales producía calor por medio de la fricción fluida con el movimiento de unas paletas sumergidas en agua. A partir de esta época se comenzó a abandonar la interpretación del calor “como sustancia” y se comenzó a interpretarlo como “una forma de energía”.

Lo importante fue que la noción teórica, al estar basada en un modelo construido sobre la base de analogía material, tuvo la posibilidad de ir evolucionando y junto a ella las teorías asociadas. Esta evolución estuvo acompañada de un incremento positivo en el conocimiento del sector de la realidad de estudio que involucraba los efectos asociados al “calor”. Con esto se considera que queda bien ejemplificada la afirmación de Hesse de que los modelos habilitan a realizar predicciones porque conducen a nuevas interpretaciones de algunos términos teóricos, las cuales pueden ser entonces utilizadas para derivar nuevas relaciones entre observables.

Si el sentido requerido para predicción es que conduzcan a nuevas relaciones entre nuevos predicados de observación, entonces se ha mostrado que esto es lo que ha ocurrido históricamente, a pesar de ser un modelo asociado con falsas teorías. Lo que se puede afirmar entonces es que modelos asociados con falsas teorías pueden haber resultado fuertemente predictivos.

Dijimos anteriormente que el modelo1 para el nuevo dominio es construido desde la teoría del dominio fuente (modelo2) por la eliminación (abstracción) de la analogía negativa. Modelos analógicos para un nuevo dominio son siempre el resultado de algún tipo de abstracción o idealización.

El contexto de justificación

Hemos visto con ejemplos históricos cómo pueden ser utilizados estos modelos, una vez construidos, para desarrollar una teoría, esto es, cómo los modelos analógicos constituyen un medio por el cual se puede proponer una teoría para un determinado dominio probando la teoría del modelo como teoría del nuevo dominio empleando los nexos de similaridad. Ahora bien, *¿pueden ser estas teorías basadas en modelos, incluidas dentro de un marco metódico para el proceso de justificación de sus resultados?*

Hemos ya resaltado diferencias en el contexto de descubrimiento que presentan los métodos inductivo, hipotético-deductivo y el de los modelos analógicos.

En el *contexto de justificación* coinciden todos ellos respecto a poner a prueba las consecuencias observacionales deducidas. En este contexto los tres métodos confluyen de alguna manera, la diferencia podrá estar en qué significa confirmación en cada uno de los casos, pero realizar deducciones, obtener consecuencias observacionales y ponerlas a

prueba vale tanto para el método inductivo, como para el hipotético-deductivo y como para el de los modelos analógicos.

El método analógico, en el contexto de justificación, se asemeja al método hipotético-deductivo ¿Cómo funciona el método hipotético-deductivo? El método funciona de la siguiente manera: a partir de una o varias *hipótesis de partida*, se van deduciendo *hipótesis derivadas*. Finalmente, se llega a obtener afirmaciones denominadas *consecuencias observacionales*, éstas se cotejan con la experiencia efectuando observaciones pertinentes, las que corroborarán o refutarán las consecuencias observacionales y, en consecuencia, la hipótesis de partida. Esta operación de poner a prueba las consecuencias observacionales a través de las observaciones pertinentes se denomina contrastación ([18],pp.137-39).

Aquí se debe recordar que la deducción lógica únicamente garantiza la conservación de la verdad; pero nada impide que, razonando correctamente, de hipótesis falsas se obtengan consecuencias observacionales verdaderas. Por consiguiente, si las consecuencias observacionales son confirmadas (corroboradas) mediante las observaciones pertinentes, esto nada nos dice respecto de la certeza total acerca de la verdad de las hipótesis de partida; estas bien pudieran ser falsas.

¿Qué pasa en el caso contrario, en el que las consecuencias observacionales son falsadas o refutadas? Para comprenderlo, es necesario tener en cuenta que las deducciones que se efectúan desde las hipótesis deben ser razonamientos correctos o válidos. Por definición, un razonamiento correcto es el que por su forma garantiza la conservación de la verdad desde las premisas a la conclusión. Las premisas son las hipótesis de partida, y la conclusión es la consecuencia observacional que al contrastar, estamos tomando en consideración. Si hay refutación (“falsación”) de la consecuencia observacional, es decir, si la conclusión del razonamiento es falsa (como lo ha indicado la experiencia), esto indica que la hipótesis de partida o alguna de las hipótesis de partida, si es que hay varias, es falsa. Luego, una consecuencia observacional predicha y refutada por las observaciones obtenidas en las experiencias, nos obliga a reconocer que alguna de las hipótesis de partida es falsa.

La inclusión de los modelos analógicos se realiza primariamente en el contexto de descubrimiento de una teoría, considerando a los mismos como fuente de hipótesis, y producir un razonamiento correcto con este método incorpora a la falsación como fuente de soporte lógico a la prueba de teorías desarrolladas con modelos analógicos sobre la base de analogía material. Esto podría estar explicando también el hecho de que

muchas teorías no son abandonadas cuando surge una falsación, sino que se las trata de mantener incorporando o reemplazando hipótesis.

¿Es necesario detenerse para analizar la justificación del argumento analógico con modelos? Opino que no es necesario porque en la utilización de los modelos con el fin de desarrollar una teoría, el argumento analógico se está utilizando primariamente como una forma de suministrar hipótesis donde estas últimas son las que van a tener que ser justificadas por el rol que les toca desempeñar en la teoría.

La función del argumento analógico con modelos científicos como proveedor de hipótesis lo podríamos aceptar simplemente considerando las ventajas que pudiera presentar frente a otras formas alternativas. El argumento basado en un modelo analógico basado a su vez en una analogía material presenta ventajas porque las hipótesis alternativas son extraídas desde un grupo que posee propiedades causalmente relacionadas y que se encuentran en un estado de hipótesis potenciales en cuanto no se sabe si podrían compararse positivamente o negativamente con las propiedades observadas en el nuevo dominio a investigar. Hesse afirma que el grupo de analogía neutra es lo interesante de los modelos analógicos, puesto que está formado por propiedades que en un estado dado de la investigación no se conoce si van a presentar similitud o no con propiedades del dominio blanco, y en tal sentido pueden ser utilizadas al momento de tener que suponer algo, y de esta manera las hipótesis no resultan arbitrarias porque son extraídas desde un lugar en donde muy posiblemente existan relaciones causales entre las mismas. Hesse expresa que “la justificación del término teórico postulado dependerá del éxito de las predicciones, [...]” ([11],p.96).

Recapitulación

Observando y analizando los casos históricos citados, junto a la teoría de Hesse sobre los modelos analógicos, es posible destacar, a manera de síntesis, las siguientes etapas que surgieron en la marcha del descubrimiento y desarrollo de una teoría cuando la misma está basada argumentando desde un modelo analógico constituido sobre la base de una analogía material.

Surge un nuevo problema. Para explicar estos fenómenos observables nuevos y las regularidades entre ellos, se intenta descubrir apropiadas estructuras y mecanismos inobservables, subyacentes al fenómeno.

Se inicia una etapa de búsqueda en el terreno de lo observable recurriendo a alguna fuente de conocimiento que resulte familiar y se considere bien fundada científicamente, con el objetivo de descubrir o suponer similitudes y disimilitudes observables entre este dominio y el dominio nuevo a investigar.

Se comienza una etapa para la propuesta de un modelo realizando el agrupamiento de las semejanzas, asemejanzas y restantes propiedades observables entre dominios en tres grupos, analogía positiva, analogía negativa y analogía neutra, respectivamente.

Con algún criterio para elegir cuáles similitudes o componentes de los grupos de analogía se deben tener en cuenta para intentar una solución y con algún criterio específico de qué tipo de acción o inferencia exitosa es requerida en el sector de la realidad en estudio, se construye un modelo del cual se espera que simule o refleje las estructuras y mecanismos que resultan inobservables en el dominio de estudio.

Con el modelo constituido en función de las analogías positiva y neutra, cuyas propiedades componentes son observables, se propone una teoría inicial. El modelo es tal que si representa correctamente estas estructuras y mecanismos, con la teoría inicial propuesta, entonces el fenómeno observado podría ser explicado. Se propone la teoría del modelo como una teoría del nuevo dominio.

Comienza una etapa deductiva. Teniendo construido el modelo se procede a probarlo, por medio de la teoría, como una descripción hipotética de las entidades actualmente existentes y de sus relaciones, para ello deductivamente se extraen consecuencias observacionales, donde estas consecuencias son establecidas en una manera abierta a pruebas experimentales.

Comienza una etapa de prueba de la teoría basada en el modelo. Para ello una vez establecidas las pruebas experimentales se efectúan las observaciones pertinentes para contrastarlas con las observaciones predichas en la etapa de deducción. La etapa de prueba es una etapa que implica el contacto con la realidad y especialmente con la experiencia.

Si estas pruebas son exitosas, esto da buenas razones para creer en la "existencia" de estas estructuras y mecanismos; la razón inicial para esta creencia es que, donde ellas existan, el fenómeno original podría ser adecuadamente explicado, esto es, el resultado de estas pruebas serían otras instancias adicionales de corroboración a la obtenida inicialmente al comprobar que explicaban el fenómeno original.

Si las pruebas no son exitosas, esto es que las consecuencias observacionales predichas no surgen cuando se realizan las experiencias, entonces estamos lógicamente

habilitados por el tipo de razonamiento Modus Tollens para afirmar que estas estructuras y mecanismos no representan correctamente el fenómeno observado; se dice en este caso que al quedar falsada o refutada la consecuencia observacional lo mismo ocurre con los mecanismos y estructuras, por lo tanto las hipótesis sobre los mecanismos y estructuras quedan falsadas.

En caso de falsación generalmente se reinicia el proceso, eligiendo desde la fuente de analogía neutra alguna propiedad que pase a contribuir en la formación de una nueva hipótesis sobre los mecanismos y estructuras inobservables, esto hace que la teoría inicial ahora se vea modificada, esto es se produce una evolución en la teoría inicial por el hecho que las nuevas hipótesis incorporadas no son arbitrarias sino que se eligen desde un grupo de propiedades que pueden estar relacionadas causalmente, esto hace que la modificación que se produciría en la teoría inicial posiblemente no la transforme en una teoría totalmente nueva sino simplemente en algo similar a la inicial, debido posiblemente, a la nueva interpretación dada a algún término teórico.

En caso de corroboración, puede ser posible probar obtener adicionalmente una directa corroboración de estas afirmaciones existenciales por medio del desarrollo y uso apropiado de instrumentos de medición.

Es conveniente remarcar que el argumento analógico es inconcluyente, por lo menos por dos aspectos, por razones inductivas y porque puede reposar sobre una incompleta localización de similitudes ([11],p.77), no obstante, no presenta mayor problema si el argumento analógico va a ser utilizado como en nuestro caso, como un medio suministrador de hipótesis alternativas sobre las cuales recaerá el aspecto justificatorio.

Segunda Parte

Algunos aspectos básicos de fluidos

Básicamente se puede definir un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de una tensión tangencial de corte, por tanto, en ausencia de ésta, no habrá deformación. Comenzaremos realizando una introducción básica sobre algunas propiedades de un fluido y particularmente sobre el concepto de tensión tangencial.

El estudio ingenieril de un fluido involucra, en la mayoría de los casos, su concepción como medio continuo, esto significa que la mínima región de fluido que se está

considerando cumple con la condición que es de un volumen tal que la observación macroscópica de las propiedades del fluido, que pueden ser su densidad, temperatura, presión, no se manifiesta como algo discontinuo. Los valores de estas propiedades varían suavemente cuando pasamos a observar un volumen próximo al inicial.

Cada región o masa de fluido puede tener valores distintos de las diferentes propiedades que se le puedan asignar, por ejemplo, no todas tienen el mismo movimiento como se puede ver observando el agua que corre alrededor de una columna de un puente, esto lleva a que cada pequeña región de fluido posea un valor diferente de velocidad. Para hacer más fácil la comprensión de esos movimientos tan complejos se recurre a imaginar el total del fluido como subdividido en muchas pequeñas regiones, tales que cada una tiene su propia trayectoria y valores de las distintas magnitudes físicas. Esas regiones “pequeñas” de fluido de identidad fija se denominan “partículas de fluido”. Este concepto de partícula resulta necesario porque de alguna manera se tienen que dejar establecidos límites físicos a los fines de poder precisar las acciones que provocan el movimiento y el estado termodinámico del fluido. El concepto de partícula en este caso está asociado a una discretización de un medio continuo.

Hablemos un poco sobre las fuerzas que actúan sobre partículas de fluidos. Para hacer la situación más concreta, podríamos imaginar que un cubo que podemos sostener en nuestra mano representa, en una escala enormemente magnificada, nuestra partícula de fluido, tal representación es la que comúnmente se encuentra en libros de texto destinados a la enseñanza. Quizás la razón de realizar esta representación de la partícula es que ya nos encontramos familiarizados con las distintas fuerzas que puedan estar actuando sobre el cubo y además otra razón importante es que la partícula fluida no es observable sino que es una idealización que se está realizando sobre una determinada región de fluido, de esta manera las distintas fuerzas aplicadas a una partícula fluida son vistas a través de la similaridad con la representación establecida. Volviendo a la representación de partícula podemos decir que aunque muchos tipos diferentes de fuerzas pueden actuar sobre el cubo, se pueden colocar todas en dos categorías que podemos denominar, fuerzas corporales y fuerzas de superficie. Las fuerzas corporales actúan a distancia y sobre el material en conjunto, pueden deberse por ejemplo a la acción ejercida por el campo gravitatorio, el campo eléctrico, el campo magnético u otras causas. Si el cubo que estamos tomando en consideración se mantuviese flotando en un depósito de agua en estado estacionario, además de estar sujeto a la atracción de la gravedad deben existir otras fuerzas que actúen y logren su equilibrio, estas fuerzas

pueden provenir del contacto entre superficies con las partículas que se encuentran a su alrededor, estas fuerzas superficiales pueden ser normales y tangenciales o de corte actuando por contacto directo entre la partícula y el fluido que la rodea, el fluido circundante ejerce fuerzas superficiales directamente sobre las superficies de las caras del cubo con el que está en contacto. Las fuerzas normales actúan perpendicularmente a la superficie como cuando el cubo inmóvil es sostenido sobre la tapa de una mesa por el empuje hacia arriba que la mesa ejerce sobre la cara inferior del cubo. Las fuerzas de corte actúan en forma tangencial o paralela a la superficie; como cuando el mismo cubo habiendo recibido un impulso (empujón) a lo largo de la mesa ve disminuida su velocidad por la fuerza friccional de corte que ejerce sobre su cara inferior la parte superior de la mesa. De esta manera podemos ya estar visualizando las distintas fuerzas que pueden actuar sobre una partícula fluida.

Las partículas fluidas, como es conocido, tienen la particularidad de experimentar grandes cambios en sus formas geométricas cuando se las somete a fuerzas tangenciales, aún con valores muy pequeños de éstas, y también resisten al cambio de forma; la propiedad del fluido que representa la magnitud de esta resistencia a la deformación se llama viscosidad y cuantifica la resistencia que ofrecen las diferentes capas de un fluido determinado, por ejemplo agua o aire, a deslizarse unas sobre otras; la viscosidad se presenta como análogo al rozamiento entre sólidos en contacto, con la diferencia que en un fluido esta resistencia se manifiesta como una fricción interna al medio material, pasando a ser la viscosidad una propiedad de medio continuo fluido.

Un concepto que presenta relación con la misma y que de alguna manera permite ir conociendo que pasa interiormente al medio continuo, es el concepto de tensión. El concepto de tensión resulta necesario para realizar el estudio cuantitativo de un medio continuo, sea sólido, líquido o gaseoso y proporciona una forma conveniente para describir la manera en la cual las distintas fuerzas que actúan sobre las fronteras del medio se transmiten a través de él. Se define “tensión” como una fuerza, interna al medio continuo, que está asociada a una superficie plana de valor unitario de una partícula del medio. Si pensamos nuevamente en el cubo como representando la partícula de estudio y en cada una de las seis caras planas, con un área de valor unitario, actúan fuerzas normales y fuerzas tangenciales podemos hablar de tensiones normales y tensiones tangenciales sobre una partícula fluida, respectivamente.

Para dar una descripción completa de las acciones sobre una partícula se tuvo que idear, adicionalmente, el concepto de “estado tensional”. Simplemente nos limitaremos al

concepto de tensión. Tensión y estado tensional son conceptos desarrollados para resolver cuantitativamente el estado o comportamiento interior de un cuerpo o medio físico continuo, sea sólido - líquido o gaseoso, cuando se encuentra sometido a acciones externas.

En el interior de un fluido podemos encontrar, como hemos mencionado, tensiones normales y tensiones tangenciales; sobre estas últimas nos extenderemos en forma particular ya que tienen la característica de estar presentes solamente cuando el fluido se encuentra en movimiento.

En lo que se refiere a las tensiones tangenciales que se desarrollan en un medio fluido las primeras observaciones fueron realizadas en 1687 ([23]) por Sir Isaac Newton (1642-1727) quien determinó en forma experimental la ley que cumplen las tensiones tangenciales cuando el tipo de movimiento que desarrolla un fluido es laminar, esto le permitió proponer la hipótesis que expondremos a continuación..

1687 - Hipótesis sobre la resistencia interna de un fluido. El surgimiento del concepto de tensión tangencial laminar.

En la obra *Principios Matemáticos* ([23]) de Isaac Newton publicada por primera vez en 1687 se encuentra la primer hipótesis que fue tomada en consideración científicamente y que es reconocida actualmente como uno de los primeros aportes significativos que brindó fundamento a todo el desarrollo posterior de teorías destinadas a explicar y predecir el movimiento de los fluidos. La hipótesis en su texto original, se encuentra expresada de la siguiente manera ([23],p.444):

Hipótesis

La resistencia debida a la falta de lubricidad de las partes de un fluido es, en igualdad de las demás condiciones, proporcional a la velocidad con que las partes del fluido se separan unas de otras.

Sobre esta hipótesis trataremos de rescatar y relacionar algunos aspectos que resultan interesantes en cuanto hace a la intervención de la analogía en el desarrollo de una teoría.

Si consideramos la siguiente experiencia podemos visualizar lo mencionado en la hipótesis: si dos placas se deslizan una sobre la otra, entre las que se ha colocado una

una fina capa de un líquido, se observa que es necesario realizar una fuerza en dirección paralela a la placa superior y sobre la misma para vencer la resistencia que opone el fluido y de esta manera poder mantenerla deslizándose siempre a la misma velocidad mientras la inferior permanece en reposo. La fuerza necesaria resulta proporcional al área A de las placas y a la diferencia dV de velocidades entre las placas (lo que es lo mismo, a la velocidad con que las partes del fluido se separan unas de otras) e inversamente proporcional a la distancia dy entre las placas. Utilizando una determinada variedad de fluidos y manteniendo las restantes condiciones se observa que el valor requerido de la fuerza para poder mantener las mismas condiciones resulta distinto para cada fluido que se utilice. Esta situación se expresó formalmente incorporando un coeficiente constante, representando el mismo un factor característico de cada fluido cuando la temperatura del mismo se mantiene constante en la experiencia. Los resultados experimentales quedaron relacionados de la siguiente manera:

$$\tau_{\text{laminar}} = \text{constante} \frac{dV}{dy}$$

donde τ_{laminar} es la tensión de corte tangencial, representativa de la resistencia interna del fluido, y es presentada como la fuerza tangencial que actúa sobre un área de valor unitario.

Esta forma matemática, que incorpora la separación entre las partes de un fluido, es la correspondiente a la hipótesis formulada por Newton; los fluidos (líquidos o gases) que responden a ella son denominados fluidos newtonianos. Esta expresión nos dice que la tensión tangencial o resistencia interna desarrollada entre capas deslizándose en forma laminar es proporcional a la diferencia de velocidades que existe en el espesor dy de la capa fluida, a través de un factor constante propio de cada fluido como se manifiesta experimentalmente. El factor de proporcionalidad recibió el nombre de viscosidad dinámica μ y se atribuye a Maxwell, en una posterior etapa histórica, haberle dado este nombre y una interpretación.

La hipótesis formulada permitió a Newton realizar proposiciones acerca del movimiento de un cilindro ([23],p.444) dentro de un medio fluido y proposiciones acerca del movimiento de una esfera ([23],p.447) dentro de un medio fluido. Es interesante ver cuáles fueron las necesidades que en principio existieron y que estimularon el desarrollo de estas proposiciones. En el libro segundo ([23],p.453), cuando se refiere a la proposición acerca del movimiento de una esfera dentro de un medio fluido, encontramos lo siguiente:

“En esta proposición he intentado investigar las propiedades de los vórtices con el fin de determinar si los fenómenos celestes pueden explicarse recurriendo a ellos”.

Esta proposición le permitió a Newton rechazar la teoría de los vórtices que utilizaba Descartes y que se encontraba en vigencia; con ella se trataba de explicar el movimiento en órbitas que describían las esferas planetarias. Descartes explicaba el movimiento circular de los objetos en términos de “vórtices”: en su teoría, todo el espacio está lleno de un tenue fluido de corpúsculos, en el que hay remolinos circulatorios, cuyo movimiento arrastraba a los planetas y los satélites alrededor de los cuerpos de gran masa. Newton en sus Principia expresó, con sus resultados sobre el movimiento de esferas sumergidas en fluidos que se encontraban afectados por una resistencia interna de acuerdo a su hipótesis, el rechazo a la teoría de los vórtices como explicación de las órbitas realizadas por los cuerpos celestes, mostrando una firme convicción por la validez de la hipótesis formulada; si bien rechazaba la teoría cartesiana que explicaba las fuerzas planetarias por los vórtices, aceptaba que las desviaciones del movimiento rectilíneo euclidiano suponía la acción de fuerzas de algún género. Si los cuerpos se aceleran hacia el centro de la tierra o del sol y no hacia otros puntos del espacio, debe haber alguna fuerza que explique porqué se desvía en la manera que lo hace.

Un hecho histórico importante que tuvo una directa vinculación con esta hipótesis (considerada en la mayoría de los textos como una ley experimental) fue el surgimiento de una teoría que logró reflejar el comportamiento interno de la materia gaseosa asumiendo la discontinuidad de la misma y donde como una de sus consecuencias se deriva lo expresado por Newton brindando en consecuencia una corroboración a la hipótesis. Además con esta teoría se logra una interpretación de los mecanismos que dan lugar al coeficiente de proporcionalidad (coeficiente de viscosidad) y en consecuencia a la resistencia interna de deslizamiento entre capas de fluidos (tensiones tangenciales laminares). Resulta interesante resaltar algunos aspectos de esta teoría, principalmente referidos a la forma en que se originó y desarrolló.

Un modelo analógico que brindó respuestas en el estado estacionario de un gas y en el movimiento laminar de un fluido

Las propiedades en el estado estacionario de los gases y en el movimiento laminar de fluidos constituyeron uno de los primeros campos de conocimientos bien observados científicamente y estudiados experimentalmente. Toda una serie de leyes habían quedado

establecidas en forma experimental, en 1661 Boyle ya había obtenido una de estas leyes. Desde un punto de vista microscópico se encontraba ya aceptada la idea de la constitución de la materia por una determinada combinación y agrupamiento de átomos. Fue Amadeo Avogadro (1776 - 1856), químico italiano, quien presentó la palabra "molécula" para denotar los pequeños grupos en que se combinan los átomos y también autor de una hipótesis sobre las moléculas de los gases. El número de Avogadro (6×10^{23}) es el número de moléculas contenidas en una molécula-gramo. *La manera en que las "moléculas" interactuaban entre sí para producir los efectos macroscópicos observados en los gases era algo que no se conocía. ¿Cómo obtener conocimientos de este nuevo dominio?*

En el caso particular de los gases diluidos se logró obtener una teoría exitosa que reflejó el comportamiento interno de la materia. Esta teoría permitió describir los mecanismos internos y cuantificar principalmente las propiedades macroscópicas y observables de gases, propiedades de equilibrio (tales como las representadas por la ecuación de estado) y propiedades de no-equilibrio o transporte, como *viscosidad*, difusión, conductividad térmica y permitió también deducir, como consecuencias de las hipótesis que se establecían, las leyes anteriormente obtenidas en forma experimental.

Nos referimos a la Teoría cinética de los gases; se considera que su origen se corresponde con trabajos de Daniel Bernoulli, donde en su "*Hydrodynamica*" publicado en 1738 ([08],p.192) ([15],p.12) *recurrió a los choques de partículas móviles para explicar* la presión que ejercían los gases. En la representación primitiva de Bernoulli las partículas elementales de los gases se mueven en línea recta hasta chocar con la pared del recipiente, todas con una velocidad uniforme, Bernoulli logra deducir la ley de Boyle.

Esta modelización fue retomada un siglo más tarde por otros científicos, tales como Clausius, Maxwell, Boltzman, van der Waals, quienes fueron perfeccionando la teoría. Joule (1848), Clausius (1857), Maxwell (1859) fueron algunos de los científicos que hicieron su aporte a esta teoría. Joule *calculó* con qué rapidez deberían moverse las moléculas de un gas para producir, por impacto contra una superficie, la presión observada del gas. En el aire caliente debían las moléculas moverse con mayor velocidad y en el aire frío más lentamente. En general, la energía de movimiento por molécula resultaba proporcional a la temperatura, medida en relación con el cero absoluto en el cual se consideraba nula la energía de movimiento. Un estudio más riguroso de ésta y otras cuestiones del mismo aspecto lo realizó J.R. Clausius ([15],p.251), profesor de física en Bonn, en 1857 quien comenzó estableciendo tres hipótesis simplificadoras: las

moléculas de un gas se mueven todas con igual velocidad, no ejercen fuerzas excepto cuando producen colisión; y son de tamaño infinitesimal de manera tal que la mayor parte del espacio es vacío. Demostró entonces que la presión de un gas sería igual a los dos tercios de la energía de movimiento de todas las moléculas en la unidad de volumen del gas. La ley obtenida experimentalmente por Boyle (1661) podía ser explicada. También suponiendo que el gas fuera calentado sin permitirle aumentar el volumen, entonces la energía del movimiento molecular aumentaría proporcionalmente a la temperatura absoluta, de modo que la presión debía ser, asimismo, proporcional a la temperatura absoluta. Así quedaba también explicada la ley de Charles y de Gay-Lussac, dada a conocer primero por este último en 1802, aunque había sido descubierta experimentalmente por Charles hacia 1787.

Clausius demostró también que las moléculas de gases diferentes deben moverse con velocidades diferentes, siendo la velocidad en cada gas inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular; esta ley la descubrió Thomas Graham en 1846 mediante experimentos sobre la difusión de los gases al través de paredes porosas. Demostró también Clausius que la ley de Avogadro, se deducía también como una consecuencia. Esta ley dice que: "Bajo las mismas condiciones de presión y temperatura, un volumen dado de un gas contendrá siempre el mismo número de moléculas cualquiera que sea la naturaleza del gas".

Las tres hipótesis simplificadoras de Clausius, si bien permitieron deducir leyes previamente establecidas, resultaron insostenibles. La hipótesis que todas las moléculas de un gas se mueven con igual velocidad fue cambiada argumentando que las moléculas de un gas tienen que chocar unas con otras a intervalos frecuentes, y en cada colisión debe cambiar su velocidad, incluso si las velocidades fuesen iguales en algún momento, muy pronto cesarían de serlo. En el año 1859, James Clerk Maxwell, se ocupó en este tema y trató de hallar cuál sería la velocidad media de las moléculas teniendo en cuenta el efecto perturbador de las colisiones. Maxwell descartó la hipótesis de que las moléculas ejercían fuerzas unas sobre otras únicamente en los momentos de choque; suponía que las moléculas ejercían fuerzas repulsivas mutuamente, incluso cuando no están en contacto; estas fuerzas se suponía que existían a todas las distancias, pero eran insignificantes excepto a distancias muy cortas. Suponía Maxwell que su intensidad disminuía en razón inversa a la quinta potencia de la distancia habiéndole llevado ciertos experimentos a pensar que ésta era la verdadera ley de la fuerza molecular. De acuerdo

con esta hipótesis, estudió varias propiedades de los gases, especialmente sobre conducción del calor, difusión y fricción interna o viscosidad.

Por medio de la teoría cinética molecular la "tensión tangencial laminar" pudo ser vista a través de una interpretación analógica por lo que ocurre con el movimiento de diminutas esferas elásticas como resultado del mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento que se produce durante el choque de las esferas, donde cantidad de movimiento está definida como una propiedad que se le puede asignar a todo cuerpo material de masa m que se encuentre en movimiento con una velocidad V y cuantificada por el producto de la masa por su velocidad. Por ejemplo si un camión y un automóvil pequeño marchan a la misma velocidad le asignamos una mayor cantidad de movimiento al camión, y si entre ambos se produce una colisión decimos que en tal caso se produce una transferencia de cantidad de movimiento entre los móviles. Una analogía burda puede resultar útil para dar explicación de la tensión tangencial por viscosidad como resultado de este mecanismo. Supongamos que se mueven paralelamente entre sí, como dos capas de fluido en un movimiento laminar, dos trenes en el mismo sentido a lo largo de vías próximas, siendo la velocidad de uno de ellos superior a la del otro. Imaginemos que unos obreros situados sobre ambos trenes toman constantemente sacos de arena de su tren y los arrojan al otro. Existe entonces un transporte y una transferencia de cantidad de movimiento entre los trenes de modo que el tren más lento tiende a acelerarse (esto es va un poco más rápido) y el tren más rápido tiende a ir un poco más despacio. Todo ocurre como si el tren lento ejerciera una fuerza sobre el tren más rápido que trata de frenar su movimiento y viceversa. Esta fuerza puede ser vista como un rozamiento entre ambos trenes similar a la resistencia que ofrecen las diferentes capas o láminas de fluido a deslizarse unas sobre otras. En lugar de fuerzas se habla comúnmente de fuerzas por unidad de área, lo conocido como tensión. En este caso particular la fuerza de rozamiento sería paralela a la marcha de los trenes por lo cual si hablamos de tensión correspondería a una tensión tangencial.

Esta imagen presentada, si se quiere burda, es la imagen actual de interacción al nivel de partículas subatómicas. Las cuatro fuerzas que se consideran fundamentales y que dan cuenta de la actividad de la naturaleza, pueden ser acomodadas dentro de esta imagen, donde puede mantenerse la idea básica del intercambio de una partícula mensajera. El electromagnetismo, la gravedad, la fuerza débil y la fuerza fuerte son cuatro fuerzas de la naturaleza. Cada tipo de fuerza posee su propia partícula mensajera. El fotón es el mensajero para el electromagnetismo. El gravitón lo es para la gravedad. Las partículas

W y Z lo son para la fuerza débil. El gluón lo es para la fuerza fuerte. Por ejemplo podemos decir que según la descripción cuántica de la dispersión de partículas cargadas, la fuerza es transmitida por un fotón mensajero que se intercambia entre partículas, tal el caso de electrones. Sin partículas mensajeras (fotón en el ejemplo) no habría fuerzas y cada partícula (electrón en el ejemplo) desconocería la existencia de sus vecinas. No habría estructuras y no se producirían actividades ni consecuencias.

Con el modelo cinético-molecular es de esta manera cómo se llegó a interpretar la tensión tangencial laminar y obtener resultados para el coeficiente de viscosidad, propio de cada fluido, donde los sacos de arena estarían representando, a manera de partículas mensajeras, las “moléculas” que se trasladan desde un nivel microscópico a otro, transportando y transfiriendo cantidad de movimiento y la separación entre los trenes la podríamos ver como el camino libre de choques que las moléculas recorren en promedio.

La propiedad de viscosidad recibió por medio de esta teoría una explicación y una interpretación por medio de un modelo analógico. Uno de los conceptos que interviene en la explicación de la viscosidad es el de *camino libre medio*, o la distancia promedio que una molécula recorre entre colisiones. Desde que el gas se está considerando *como* compuesto de esferas elásticas impenetrables, una colisión entre dos “moléculas” está bien definida. En la teoría cinética molecular de los gases los coeficientes de transporte pueden ser expresados en términos del camino libre medio ξ . Consecuentemente la viscosidad, difusión y conductividad térmica son algunas veces referidos como fenómenos de camino libre medio. Sin embargo, en las aproximaciones más rigurosas para los gases reales se encuentra que el camino libre medio no aparece en la derivación de las propiedades de transporte. Este concepto presenta en la actualidad vigencia e importancia como concepto cuantificable que permite, a través de relaciones convenientes con otras propiedades, decidir cuándo un medio material puede considerarse como continuo en su estructura.

Si consideramos la manera en que fue concebida esta teoría un aspecto importante es que fue generada a través de reconocer *similaridades* con el conocido dominio del movimiento de las esferas sólidas que se regía por las leyes de Newton, esto permitió desarrollar un *modelo analógico* que fue utilizado para argumentar sobre el comportamiento de los gases. La suposición de la validez de las leyes de la mecánica newtoniana que regulaban el comportamiento del modelo, a un nivel microscópico en el dominio de los gases donde por ejemplo las escalas de longitudes, masas y tiempos

involucradas resultaban muy disimiles con las presentes en el modelo, permiti6 explicar y predecir con 6xito distintos comportamientos globales de los gases previamente establecidos en forma experimental.

Al momento de la concepci6n de la teor6a, las leyes del movimiento desarrolladas por Newton eran bien conocidas y se sab6a que produc6an buenas predicciones a un nivel macrosc6pico, ahora bien ¿es v6lido pensar y hacer c6lculos con un modelo extra6do del dominio macrosc6pico conocido y gobernado por estas leyes *como si fuese* el sistema del nuevo dominio que queremos investigar? Si as6 resulta entonces podr6amos estar obteniendo conocimiento sobre este nuevo dominio basados en el conocimiento del dominio ya conocido. Estos fundamentos, que de alguna manera validar6an realizar esta transferencia de conocimientos, son los que ofrece la teor6a de modelos anal6gicos desarrollada por Hesse y que hemos tratado en la primer parte de este trabajo, llev6ndonos a concluir que si los resultados predichos por el modelo se corresponden con los resultados de las experiencias efectuadas sobre el nuevo dominio entonces podr6amos seguir utilizando el modelo para obtener nuevos conocimientos del dominio a investigar, y si los resultados del modelo no acuerdan con las experiencias tambi6n de alguna manera se est6 obteniendo conocimiento, porque ya sabr6amos que el nuevo dominio no se corresponde con el modelo propuesto. Algo similar a esto parece lo sucedido hist6ricamente con la concepci6n y el desarrollo de esta teor6a, y adem6s se encuentran algunas caracter6sticas particulares y positivas que son atribuibles al tipo de modelo anal6gico que se estableci6.

Es de destacar que uno de los pasos previos al desarrollo de la teor6a fue el estudio experimental de las propiedades macrosc6picas del sistema en el nuevo dominio obten6ndose datos y leyes emp6ricas correspondientes al comportamiento de estas propiedades, luego la construcci6n de un modelo del sistema fue lograda identificando y proponiendo similitudes *entre* estas propiedades observadas y con propiedades observadas de un dominio familiar. Las relaciones causales del modelo, las leyes de la mec6nica de Newton, permitieron explicar y cuantificar las propiedades ya observadas del sistema; tambi6n algunos valores predichos resultaron corroborados con los valores luego observados experimentalmente, dando pautas de que el modelo propuesto resultaba adecuado y cuando no concordaban la teor6a no se abandono sino que se produjeron modificaciones en el modelo; lo importante aqu6 de resaltar es que el modelo pudo modificarse o reemplazarse por otro diferente hasta que sus predicciones fueron satisfactorias, pero lo interesante que resulta analizando esta teor6a desde una perspectiva

de la teoría de modelos analógicos de Mary Hesse es que estas modificaciones no resultaron arbitrarias.

Pasemos ahora al tema de la turbulencia, trataremos de exponer algunos aspectos históricos anteriores al surgimiento del concepto de longitud de mezcla, que resultan interesantes para el análisis del mismo desde el punto de vista adoptado. Comenzaremos con una perspectiva histórica sobre la identificación de la turbulencia para luego presentar algunas características relacionadas con el fenómeno.

Perspectiva histórica sobre la identificación del movimiento turbulento de un fluido y una necesidad de respuestas.

En 1839 un ingeniero alemán, G. H. Hagen ([30],p.335), indicó por primera vez la existencia de dos regímenes del movimiento de un fluido viscoso. Midió la diferencia de presión entre los extremos de una cañería por la cual circulaba un determinado caudal de agua y estableció la siguiente ley como consecuencia de sus experiencias:

$$\Delta p = (\text{constante}) \frac{L \cdot Q}{R^4}$$

donde

Δp : diferencia de presión entre los extremos del conducto

L: longitud del conducto

Q: caudal que circula por el conducto

R: radio del conducto

Lo interesante encontrado por Hagen es que la ley dejaba de ser válida al pasar el caudal Q circulante de cierto valor, y señalaba que debía haber un segundo modo de flujo caracterizado por fuertes movimientos de agua sin poder clarificar las razones del cambio. Esta ecuación también fue establecida, mediante trabajos experimentales en 1840 por J.L. Poiseuille ([19],p.585), médico francés, que investigó sobre el flujo de agua a través de tubos capilares.

La primera deducción teórica ([30],p.351) que explicaba la ley empírica de Hagen y Poiseuille procede de E. Hagenbach y F. Neumann, obtenidas independientemente alrededor de 1859; esta deducción basada en la hipótesis formulada por Newton sobre las tensiones tangenciales por viscosidad, conducía a la siguiente ecuación válida en un movimiento laminar

$$\Delta p = \left(\frac{8\mu}{\pi} \right) \frac{LQ}{R^4}$$

encontrándose que la viscosidad μ del fluido intervenía en la constante planteada por Hagen. Si Hagen encontró experimentalmente que pasando un cierto caudal Q esta ley dejaba de ser válida, entonces alguna hipótesis fallaba. Por ejemplo se podría estar pensando que, en este fenómeno observado donde un segundo modo de flujo caracterizado por fuertes movimientos de agua estaba presente según Hagen, la hipótesis de Newton sobre la resistencia interna de un fluido ya no es válida. Una decisión al respecto fue tomada por O. Reynolds quien realizó importantes trabajos, experimentales y teóricos, sobre la turbulencia. Osborne Reynolds (1842 - 1912) ([30],p.48), profesor de ingeniería británico, en 1883 demostró a través de sus experiencias que el cambio del modo de movimiento, de laminar a turbulento, que había observado Hagen dependía de un parámetro adimensional ahora denominado número de Reynolds en su honor, el cual representa una relación entre fuerzas actuantes sobre las partículas del fluido [*fuerzas de inercia/fuerzas debidas a la fricción viscosa*], donde interviene: ρ la densidad del fluido que circula, V su velocidad, d una longitud característica y la viscosidad μ dinámica del fluido. En sus experiencias, introduciendo un chorro de tinta en el flujo, Reynolds observó la transición y la turbulencia. En 1895 ([30],p.341) Osborne Reynolds introdujo en las ecuaciones de movimiento de la partícula de un fluido, que se consideraba como un continuo, una descomposición del valor instantáneo de las propiedades de la partícula de fluido en un valor medio, fácilmente medible en esa época, más un valor fluctuante que no podía ser medido y que supuso representaba el efecto de la turbulencia. Aquí es donde introdujo la siguiente hipótesis: H) mientras que, según demuestra la experiencia, la ecuación de la viscosidad de Newton ya no es válida para las magnitudes medidas usualmente que son valores medios macroscópicos, es supuesta válida para las magnitudes instantáneas locales ([03],p.51). Tal descomposición e hipótesis lo condujo a encontrar unas "tensiones tangenciales" en forma adicional a las presentes cuando esas mismas ecuaciones de movimiento se utilizaban para representar el movimiento laminar de un fluido. A partir de los trabajos de Reynolds destinados a este segundo modo de movimiento denominado turbulencia, es común en la práctica llevada a cabo por científicos de esta disciplina, referirse a las tensiones tangenciales como compuestas de dos términos, un término de tensión tangencial por viscosidad de origen molecular, presente en un movimiento laminar, y un

segundo término de tensión tangencial producido por el movimiento turbulento desarrollado por “partículas fluidas” el cual recibe el nombre de “tensiones de Reynolds”

$$\tau = \tau_{\text{laminar}} + \tau_{\text{turbulenta}}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} - \overline{\rho u'v'}$$

La forma en que aparecen las tensiones de Reynolds es representativa del mismo mecanismo que da origen a las tensiones tangenciales laminares. Este mecanismo es el de una transferencia de cantidad de movimiento que producen las “partículas fluidas” cuando su velocidad media se ve perturbada por cantidades que hemos denotado por (u',v',w') .

En esa época las ecuaciones del movimiento laminar se encontraban bien establecidas con los trabajos realizados por Navier (1821) ([20],p.298) sobre fluidos incompresibles basándose en modelos moleculares y Stokes (1845) ([20],p.298) quien realizó trabajos sobre fluidos basándose sobre una teoría del continuo,

Si bien Reynolds utilizó las ecuaciones que regían el comportamiento del movimiento laminar de un fluido y que permitían resolver situaciones de movimiento laminar, el hecho de suponer unas fluctuaciones de la velocidad de una partícula en movimiento turbulento, condujo a que en los resultados que se dedujeron como consecuencia de considerar esta hipótesis aplicada a las ecuaciones del movimiento, llevó a que aparecieran en los resultados unas incógnitas adicionales que provocó que el sistema de ecuaciones matemáticas no pudiera resolverse. En este sentido el nuevo dominio de la turbulencia presentaba un conocimiento incompleto.

El surgimiento del concepto de longitud de mezcla

Ludwig Prandtl (1875-1953) ([30],p.49) trató de dar una respuesta. En 1926 propone una teoría para explicar las tensiones de Reynolds que se presentaban en el movimiento turbulento. Esta teoría fue generada proponiendo una analogía entre la longitud de mezcla y el camino libre medio.

Para describir y cuantificar tensiones tangenciales en flujos turbulentos; la longitud de mezcla de Prandtl ([12],p.249) *fue presentada como* la distancia recorrida, en promedio, por las partículas, en movimiento turbulento o aleatorio, en una dirección normal al movimiento medio del fluido, y en la cual las partículas retienen los valores de sus

propiedades, para mezclarlas solamente al final del recorrido con las partículas de su entorno.

Al suponer esta similaridad aplicó el mismo modelo analógico que explicó, en el caso de los gases diluidos, las tensiones tangenciales de Newton en el movimiento laminar. Logró formular una teoría en función del modelo de la teoría cinética de los gases.

Nos ocuparemos aquí simplemente de tratar de ver si se puede emplear el esquema de Mary Hesse en lo que se refiere al contexto de descubrimiento de esta teoría. En cuanto a los resultados que de ella se han obtenido y a las objeciones y limitaciones que pueda tener, se puede consultar la bibliografía citada ([28], pp.42-50, p.57).

Los aspectos de los cuales nos ocuparemos para analizar en el contexto de descubrimiento será determinar:

- (a) algunas de las propiedades observadas del fenómeno a explicar
- (b) algunas de las propiedades de la fuente de la cual se extrajo el modelo
- (c) si las relaciones de similaridad entre dominios pudieron resultar pre-teóricas
- (d) si las relaciones causales de la fuente estaban bien establecidas
- (e) cómo pudieron estar conformados los grupos de analogía, en particular lo ocurrido con la longitud de mezcla.

Sobre (b) y (d) se hará referencia en la sección dedicada al análisis del concepto de tensión tangencial laminar. Cuando se realice el análisis del concepto de longitud de mezcla se analizará lo relacionado con (e) y seguidamente nos referiremos a los ítems (a) y (c).

Algunas propiedades observadas en el movimiento turbulento de un fluido.

Para la propuesta de esta teoría se recurrió a un medio auxiliar que pudiera aportar conocimientos, la analogía. Si nos preguntamos porqué pudo ser aplicada una analogía en este caso diríamos que aquí se recurrió a este medio auxiliar de obtención de conocimientos gracias al *reconocimiento de una similaridad entre propiedades observadas* en ambos dominios.

Sobre esto último trataremos de extendernos un poco más y presentaremos algunas características del fenómeno relacionadas con la transferencia de cantidad de movimiento. La turbulencia en fluidos es un fenómeno donde se pueden "observar", entre otros, una mejora notable en la difusión o transporte de propiedades, por ejemplo,

cuando se establece el fenómeno de la turbulencia en una habitación que se está calefaccionando se observa que la habitación se "calienta" en menos tiempo comparado con el caso cuando la turbulencia no estaba presente. También se puede observar esta mejora en la difusión cuando se inyecta un colorante en una cañería que conduce, por ejemplo, agua, primero se lo observa como un filete ordenado en su trayectoria y luego cuando se establece la turbulencia, la coloración llena completamente todo el volumen líquido (se colorea toda el agua en poco tiempo). La difusividad produce un rápido mezclado de propiedades tales como cantidad de movimiento, temperatura y masa. Entre estas propiedades nos interesa lo que ocurre con la cantidad de movimiento.

También se pueden observar cambios en el valor de las fuerzas que un fluido ejerce sobre las superficies de los cuerpos que se encuentran inmersos dentro de una región en donde existe fluido en movimiento cuando el fenómeno de la turbulencia se establece. Esto puede ser detectado, por ejemplo, como un distinto comportamiento en la diferencia de presión cuando el movimiento del fluido se establece internamente a un conducto y puede ser asociado con un "cambio en el coeficiente de viscosidad" como trataremos de poner de manifiesto seguidamente con una experiencia sobre el flujo de una mezcla de glicerina y agua. Esta cuestión puede ser discutida con la ayuda de un equipo experimental como el construido por Hagen en la mitad del siglo XIX para el estudio del flujo en cañerías. El experimento consiste en lo siguiente: una mezcla de glicerina, la cual posee a una temperatura de 20°C un valor de viscosidad $\mu = 1.2 [\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$ y agua, con un valor muy diferente de viscosidad para el mismo valor de temperatura ($\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 0.001 [\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$), es impulsada por medio de una bomba hidráulica a través de un tubo de 4 metros de largo y 3 centímetros de diámetro, manteniéndose constante la cantidad de líquido que circula por cada unidad de tiempo, esto es, se mantiene constante el caudal Q de la mezcla. La mezcla de glicerina y agua cuando sale del tubo descarga a la atmósfera. La caída de presión en el tubo es medida por un manómetro. Variando la relación de glicerina y agua se logra que la viscosidad del fluido (mezcla) pueda ser controlada desde valores altos (correspondientes a la glicerina) hasta valores bajos (correspondientes al agua).

Como hemos mencionado, Hagen y Poiseuille determinaron una ley en forma experimental, válida para el movimiento laminar de un fluido que se comportase de acuerdo a la ley empírica de Newton (a los cuales se los llama fluidos newtonianos) cuando se los hace circular a través de una cañería de longitud L y radio R , siendo L

mucho mayor que R . La mezcla de glicerina y agua se puede considerar como un fluido newtoniano, por lo tanto, si en esta experiencia el movimiento de las partículas fuese siempre laminar tendrían que acordar el valor leído en el manómetro con el valor predicho por la ecuación. Pero esto no es precisamente lo que ocurre en la experiencia. En un comienzo, cuando la viscosidad es reducida agregando agua, se observa que la diferencia de presión Δp disminuye, consistente con la ley experimental. Sin embargo, cuando la viscosidad es reducida aún más, uno observa en el manómetro (medidor de presión) que la diferencia de presión se incrementa, presentando por lo tanto una inconsistencia con la ley establecida. Para las altas viscosidades, mucha glicerina y poca agua, el flujo que sale del tubo es suave y estable en el tiempo. En las viscosidades más bajas, mucha agua y poca glicerina, si uno saca una fotografía de alta velocidad del flujo de salida, se revelan irregularidades en los límites del chorro. Así, cuando pasamos a las viscosidades más bajas encontramos que la ley experimental de Poiseuille no es obedecida; en lugar de seguir disminuyendo la diferencia de presión, se observa un aumento de la diferencia de presión entre los extremos del conducto. El flujo en el tubo o cañería se convirtió en turbulento, revelado por el movimiento irregular del chorro de salida y por el incremento de la caída de presión en el tubo.

Lo que queremos rescatar de esta experiencia a que nos hemos referido es lo que concierne al coeficiente de viscosidad cuando la turbulencia está establecida. Los valores de viscosidad dados para la glicerina y para el agua son coeficientes que podríamos denominar "viscosidad laminar" de origen molecular ya que estos valores se determinan experimentalmente cuando el movimiento del fluido es laminar. Cuando se establece la turbulencia todo pasa "como si" el fluido "incrementara su viscosidad" ya que se observa un aumento de la caída de presión, lo cual visto a través de esta ley experimental correspondería a un aumento del coeficiente de viscosidad. Es quizás por esta razón que generalmente se ha tratado de postular un coeficiente de viscosidad turbulenta, en forma similar al coeficiente de viscosidad laminar. La experiencia mostraba que la transferencia de cantidad de movimiento se constituía en una característica clave del movimiento turbulento.

Volvamos ahora con un poco más de detalle sobre lo que concierne al transporte de la propiedad "cantidad de movimiento", representada o identificada por el producto de la masa que posee una "partícula" por su velocidad. Esta es una propiedad que podríamos estar asociando a toda región de fluido de masa m que se encuentre en movimiento. Dijimos que a una región de fluido podemos pensarla como subdividida en pequeñas

subregiones que conservan una identidad fija, por ejemplo, una misma masa m , presión p , temperatura T , densidad, velocidad V . Por lo tanto, a cada región le podemos asociar la propiedad definida por el producto $m.V$ llamada cantidad de movimiento. Esta propiedad asociada a cada partícula en movimiento, puede ser transportada de un lugar a otro de la región ocupada por el fluido y transferida, total o parcialmente, de una partícula a otra. Hemos visto que esto ocurre cuando el movimiento del fluido es laminar y cuando una “partícula” se encuentra con movimiento turbulento se observa, como hemos tratado de ejemplificar, que éste tipo de movimiento contribuye notablemente a difundir la cantidad de movimiento, trayendo como una consecuencia fuerzas de rozamiento internas que pueden ser vistas como tensiones tangenciales turbulentas. Por ejemplo, en la experiencia que uno puede realizar con la mezcla de agua y glicerina y que da lugar a que se establezca la turbulencia, podríamos estar asociando la mayor caída de presión con el surgimiento de tensiones de corte o tangenciales originadas por el mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento, y en tal sentido podríamos pensar que estas tensiones tangenciales turbulentas *podrían haber llegado a ser detectadas en una forma pre-teórica, es decir, previo a las tensiones encontradas teóricamente por Reynolds*; sobre esta identificación pre-teórica volveremos un poco más adelante en este trabajo cuando tratemos de establecer el tipo de analogía involucrada en el concepto de longitud de mezcla de Prandtl.

A medida que los instrumentos de medición se fueron perfeccionando fue posible, recién después de 1930, corroborar las fluctuaciones supuestas por Reynolds de las propiedades de un fluido, por ejemplo la velocidad varía con el tiempo en un punto fijo del espacio en una forma aleatoria con valores superiores e inferiores a un valor que se puede tomar como promedio. Lo mismo ocurre con otras propiedades tales como presión, temperatura, densidad.

Análisis de los conceptos en el contexto de descubrimiento desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos

Desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos de Mary Hesse primeramente realizaremos un análisis sobre la analogía establecida cuando surge la teoría cinético - molecular y que da una interpretación al concepto de tensión tangencial laminar para relacionarla luego con el concepto establecido para el estudio de la turbulencia. Para la construcción de una teoría nos encontramos, según Hesse, con dos

fuentes de conocimiento que nos ayudan en esta tarea, una fuente son las propiedades observadas en ambos dominios y la otra fuente son las analogías detectadas o descubiertas entre las propiedades observadas ([11],p.12). Es importante por lo tanto especificar claramente cual es el sentido asignado a las oraciones de observación. Hesse define una "oración de observación" como aquellas oraciones descriptivas cuya verdad o falsedad bajo dadas circunstancias empíricas, podrían ser acordadas por todos los usuarios del idioma con o sin entrenamiento científico. Lo que se está queriendo decir cuando se expresa "...acordados por todos los usuarios de un idioma con o sin entrenamiento científico" es lo siguiente: todos los usuarios de un idioma no pueden poner de manifiesto o descubrir propiedades y analogías, pero, cuando las propiedades y analogías sean puntualizadas dejándolas al descubierto, entonces no se debería requerir ningún conocimiento científico para reconocer que ellas existen. Por ejemplo, si nos dicen que la viscosidad de un fluido produce una diferencia de presiones entre los extremos de una cañería cuando un fluido circula por la misma, esta afirmación fácilmente puede ser acordada por todos los usuarios de un idioma los cuales pueden estar decidiendo, con la ayuda de algún instrumento, por la verdad o falsedad de una oración de observación que involucre este hecho. Este sentido de "observable" es el que debe ser asumido en la búsqueda de analogías materiales.

- **Análisis del concepto de tensión tangencial laminar.**

En el surgimiento y construcción de la teoría cinética molecular se dispuso de estas dos fuentes de conocimiento. Si consideramos las *propiedades observadas* podríamos tener, por ejemplo, en las esferas: movimiento, velocidad, choque o impacto, masa de las esferas, cantidad de movimiento ($m \cdot v$), energía cinética, energía potencial; y en los gases: temperatura, presión, densidad de masa, volumen, viscosidad, conductividad térmica, etc.

Si consideramos las *analogías observadas entre las propiedades observadas* se podría decir, por ejemplo, que: la transparencia de un gas pudo haber hecho pensar que está compuesto mayormente por espacio vacío al igual que si tuviéramos diminutas esferas rígidas moviéndose aleatoriamente dentro de un gran recipiente lo cual lleva a postular la existencia de "moléculas" en el gas; el rebote de esferas rígidas sobre una superficie ejerce una fuerza sobre la misma y si se considera esta fuerza ejercida normalmente sobre un área unitaria pasamos a hablar de una presión ejercida sobre la

superficie, lo cual resulta similar a la presión ejercida por un gas; la cantidad de esferas, de masa m , y el espacio vacío entre ellas en un volumen dado se relaciona con la densidad de masa de un gas.

Las analogías establecidas resultaron entre propiedades ya observadas; en el nuevo dominio para los conceptos de densidad, temperatura, viscosidad, presión, volumen, se disponían de instrumentos o algún método que permitía su medición, resultando observacionales en el sentido dado por Hesse ya que especificando la forma de medición cualquier persona pudo estar decidiendo sobre la verdad o falsedad de una oración de observación que haya involucrado estas propiedades.

En el dominio conocido de las esferas en movimiento las propiedades asociadas vinculadas con masa m y velocidad V podían ser cuantificadas, por ejemplo "energía cinética" se calculaba con la expresión $(1/2).m.V^2$, cantidad de movimiento con $m.V$, donde m y V podían ser medidos separadamente. El concepto de energía ya se había comenzado a aceptar en el lenguaje común entre científicos a partir de la mitad del siglo XIX a partir de los trabajos de Joule.

Si pensamos en el *reconocimiento de las similaridades* las mismas se pudieron haber realizado *en forma preteórica*, es decir, sin tener el conocimiento de una teoría general del nuevo dominio. Por ejemplo, similaridades entre presión y rebotes de una esfera contra una superficie, densidad de masa de un gas con la cantidad de esferas de masa m que hay en un determinado volumen, estas son similaridades que no necesitamos del conocimiento de una teoría para poder reconocerlas y pueden ser consideradas como materiales y observables, lo que hace a una de las condiciones establecidas por Hesse para que una analogía material pueda ser reconocida, establecido como *condición 1*.

También las relaciones causales en el dominio fuente familiar de las esferas se encontraban bien fundadas científicamente, esto hace al cumplimiento de la *condición 2* de Hesse. Esto conduce a que las propiedades observadas y las analogías materiales establecidas entre estas propiedades pudieron ofrecer la posibilidad de realizar un agrupamiento de las propiedades como propone Hesse con el objetivo de lograr un modelo analógico. Cuando se toma una colección de esferas rígidas en movimiento aleatorio no se está asegurando que esto sea semejante en todos los aspectos a lo que ocurre con las moléculas postuladas de un gas, las esferas pueden resultar difíciles de rayar, suaves, de color, y por ello no se sugiere que las moléculas del gas tengan estas propiedades. Simplemente se está diciendo que las "moléculas" son análogas a las esferas rígidas, y la relación de analogía significa que hay algunas propiedades de las esferas que

no son encontradas en las moléculas, éstas son las *analogías negativas*. Las propiedades de las esferas rígidas que se adjudican a las moléculas son las que llamaríamos *analogía positiva*, tales como movimiento, impacto elástico, masa.

Lo importante, como hemos resaltado con anterioridad, acerca de esta forma de pensar con modelos en ciencia es que generalmente existirán algunas propiedades del modelo acerca de las cuales no conocemos si ellas van a resultar en una analogía positiva o negativa, éstas son las propiedades interesantes porque cuando se las incluye en el modelo son las que permiten realizar nuevas predicciones. Como componentes del grupo de analogía neutra podríamos pensar por ejemplo en tipos de fuerzas intermoleculares, volumen de una molécula. El conjunto de propiedades de analogía Neutra, junto al grupo de analogía positiva permite construir lo que Hesse denomina un Modelo el cual habilita para realizar un argumento del siguiente tipo: *si* los gases son realmente como colecciones de diminutas esferas rígidas, excepto en considerar su analogía negativa, *entonces* de nuestro conocimiento de la mecánica de las esferas rígidas podemos ser capaces de realizar predicciones acerca del esperado comportamiento de los gases. Si las conclusiones resultan equivocadas deberemos concluir que tenemos el modelo equivocado.

Un aspecto interesante es que el dominio familiar de las esferas rígidas dio la posibilidad de ir modificando el modelo, incorporando nuevos componentes a los conjuntos al observarse que algunas conclusiones eran equivocadas, por ejemplo hubo evolución entre el modelo de Clausius y el modelo de Maxwell. Inicialmente, la analogía positiva entre esferas y moléculas se circunscribía a las propiedades de movimiento que involucraban masa, velocidad y choque elástico. No se hacía referencia a otras propiedades que pudieran tener las esferas. Posteriormente distintas modificaciones fueron propuestas y estudiadas sus consecuencias, por ejemplo van der Waals amplió la teoría para explicar la conducta de los gases a altas presiones; consiguió esto haciendo ciertos supuestos sobre el volumen de una esfera y las fuerzas existentes entre las mismas. Estas propiedades formaban parte de la analogía neutral entre esferas y moléculas, pero no habían sido consideradas como parte del modelo. Desde la perspectiva de la teoría de modelos analógicos de Hesse la transición de la teoría cinética de los gases a la modificación efectuada por van der Waals, por ejemplo, no es vista como la sustitución de una teoría por otra sino que esta transición es considerada como una ampliación de la teoría cinética, lo mismo podría decirse de otras modificaciones, tales como la propuesta por Maxwell.

Las analogías establecidas desempeñaron un importante rol en el desarrollo histórico de las teorías sobre el comportamiento de los gases, por ejemplo las analogías establecidas permitieron desarrollar la teoría cinética elemental de los procesos de transporte, la cual condujo en el caso de los gases diluidos, a predecir con buena exactitud el valor de coeficientes de transporte, por ejemplo el coeficiente de viscosidad laminar ¿De qué manera la teoría cinética dio respuesta al coeficiente de viscosidad y a las tensiones tangenciales generadas en el movimiento laminar de un fluido, las cuales previamente habían sido determinadas en forma experimental? Alguna respuesta al respecto ya hemos dado. La teoría cinética de los gases explicó los coeficientes de transporte por medio de los mecanismos involucrados con el choque elástico de las esferas. Por ejemplo, el coeficiente de viscosidad se explicó por la *transferencia de cantidad de movimiento producida en el choque entre esferas* cuando el movimiento del fluido se supone laminar con capas deslizándose a diferentes velocidades, de igual manera como cuando se hizo la burda analogía con los trenes. El modelo, regido con las leyes de la mecánica newtoniana, permitió deducir una relación para las tensiones tangenciales laminares y donde esta relación teórica deducida concordó con la expresión de la ley encontrada experimentalmente por Newton para estas tensiones. De esta manera con los resultados obtenidos con el modelo se tuvo la oportunidad de poner de manifiesto cuáles eran las propiedades vinculadas a la estructura interna del fluido que permitían explicar, interpretar y predecir el valor del coeficiente de proporcionalidad (μ) encontrado experimentalmente, uno de estos términos vinculados a la estructura interna supuesta de la materia es el “camino libre medio”.

En la teoría cinética - molecular, considerando un gas diluido como constituido por diminutas esferas rígidas que chocan en forma elástica y donde son válidas las leyes del movimiento postuladas por Newton, se dedujo un resultado formal como el siguiente:

$$\tau_{\text{tangencial-laminar}} = - \frac{1}{3} n \bar{v} m \xi \frac{dV}{dy}$$

donde n representa la cantidad de moléculas por unidad de volumen que se trasladan de un nivel a otro, m es la masa que tiene cada molécula, \bar{v} es la velocidad media de las moléculas, ξ es el camino libre medio representando la distancia en la cual cada molécula ha tenido su último choque con otra molécula. Esta expresión dio una interpretación al coeficiente de proporcionalidad porque formalmente se pudo reducirla a la hipótesis de Newton. Como todos los términos, $n - m - \bar{v} - \xi$, bajo determinadas

condiciones son constantes al igual que el coeficiente de proporcionalidad de la expresión

$$\tau_{\text{tangencial laminar}} = \text{constante} \frac{dv'}{dy}$$

esto implicó que el producto $\frac{1}{3} n \bar{v} m \xi$ representa al coeficiente constante:

$$\text{constante} = \frac{1}{3} n \bar{v} m \xi$$

encontrándose de esta manera que un gas diluido en movimiento laminar se comporta como un medio fluido con resistencia interna (viscoso). Este coeficiente recibió el nombre de coeficiente de viscosidad dinámica μ . La teoría, por lo tanto, corroboró la hipótesis de Newton y brindó una interpretación que permitió cuantificar estos coeficientes y que en algunos casos fueron corroborados por los valores experimentales.

Estas dos instancias históricas, permiten plantear *dos interpretaciones para la resistencia interna de un fluido en movimiento* de la siguiente manera:

Interpretación 1

La resistencia debida a la falta de lubricidad de las partes de un fluido es, en igualdad de las demás condiciones, proporcional a la velocidad con que las partes del fluido se separan unas de otras.

Interpretación 2:

La resistencia debida a la falta de lubricidad de las partes de un fluido es, en igualdad de condiciones, proporcional a: la diferencia de velocidad dv' con que las partes o capas macroscópicas del fluido se separan unas de otras, a la cantidad n representativa de las moléculas en la unidad de volumen, a la masa m de cada molécula, a la velocidad promedio v con la cual las moléculas se desplazan desde una capa a otra, y a la distancia ξ (llamada camino libre medio) que recorre cada molécula antes de chocar elásticamente con otra molécula e inversamente proporcional a la distancia dy que separa las capas de fluidos contiguas.

Supongamos ahora que tenemos que incluir estas oraciones o enunciados como premisas en una teoría. Recordemos que en las teorías podemos detectar tres niveles de enunciados, un primer nivel formado por todos aquellos *enunciados singulares referidos*

a observaciones, un segundo nivel constituido por *enunciados correspondientes a generalizaciones empíricas*, y un tercer nivel de *enunciados generales* los cuales involucran la presencia de términos teóricos.

La *interpretación1* como enunciado, ¿en qué nivel se podría ubicar? Esta hipótesis en su forma original es un enunciado que podríamos clasificar como de segundo nivel ya que está referido a una generalización empírica. Si suponemos que existió una etapa previa experimental que permitió proponer y dar origen a esta hipótesis, por ejemplo observando la mayor o menor dificultad para hacer girar un cilindro o una esfera a distintas velocidades de rotación dentro de un medio fluido, entonces en este sentido la *interpretación1* constituye una oración observacional ya que cualquier persona con el conocimiento de una determinada técnica o procedimiento podría estar corroborando lo expresado en este enunciado al repetir las experiencias. Resulta interesante observar la forma en que se ha publicado esta oración ya que se lo hace a manera de Hipótesis postulándose que esta resistencia está presente en cada región o punto interior de una masa en movimiento de un fluido.

La *interpretación2* es el resultado de la intervención de un modelo analógico, constituido sobre la base de una analogía material, que permitió desarrollar la teoría cinético-molecular de la cual se obtiene esta interpretación y aquí podemos afirmar que ocurrió algo interesante con la oración, y es que evoluciona pasando a poseer contenido teórico, por ejemplo se habla de “moléculas”.

Si solamente pensamos teniendo en cuenta la *interpretación1* y utilizamos esta oración como premisa de alguna teoría para tratar de derivar nuevas consecuencias nos encontramos que nuestras posibilidades son muy reducidas en lo que se refiere a lograr la predicción de nuevos hechos observables, de todas maneras es útil para corroborar, predecir y explicar hechos entre fenómenos ya observados, en tal sentido Newton nos presentó un buen ejemplo al utilizar esta hipótesis y haber logrado refutar la teoría de los vórtices que pretendió explicar el movimiento en órbitas de los planetas:

“En esta proposición he intentado investigar las propiedades de los vórtices con el fin de determinar si los fenómenos celestes pueden explicarse recurriendo a ellos. Pues el hecho es que los tiempos periódicos de los planetas que giran en torno a Júpiter son como la $(3/2)$ ava potencia de sus distancias al centro de Júpiter, y la misma regla se aplica también a los planetas que giran en torno al sol. Y estas reglas prevalecen con la mayor exactitud en lo hasta ahora descubierto por la observación astronómica. En consecuencia, si los mencionados planetas se desplazan en vórtices que giran en torno a Júpiter y el Sol, los vórtices deberán girar conforme a aquella ley. Pero aquí hemos determinado que los tiempos periódicos de las partes del vórtice son como el cuadrado de las distancias al centro del movimiento, y esta razón no puede ser disminuida y reducida a la $(3/2)$ ava potencia salvo que la materia del vórtice sea más fluida a medida que se aleja del centro o que la resistencia debida a la falta de lubricidad de las partes del fluido sea, a medida que

la velocidad con que las partes se separan va aumentando, incrementada con ella en una razón mayor que aquella con que la velocidad aumenta, pero ninguna de estas suposiciones parece razonable....”

Es interesante hacer notar que en la *interpretación1* original no encontramos fundamentos sobre los mecanismos internos de la materia que daban lugar al coeficiente de proporcionalidad para la resistencia interna de un fluido; esto solamente fue posible gracias a la presencia e intervención de un modelo analógico, que dio lugar a que nuevos términos (observacionales y teóricos) se incorporaran en la interpretación del término de *resistencia interna*. Los mecanismos internos a la materia, que producen como efecto observable esta resistencia interna cuando una capa o lámina de fluido tiende a deslizarse respecto a otra, resultan inobservables y solamente nos queda postular determinadas formas de actuar de los componentes de la materia de forma que las consecuencias observables que resulten se correspondan con los efectos observados experimentalmente, esto se logró con la propuesta de un modelo analógico basado en una analogía material.

Para la *interpretación1* el término resistencia interna tiene un sentido observacional pero para la *interpretación2* podemos afirmar desde el punto de vista analógico asumido, que se constituye en un término con contenido teórico al cual se lo está presentando y asignando una “realidad” a través de una interpretación analógica de los mecanismos inobservables ejecutados por la materia y que explican la viscosidad de los gases diluidos. Recordemos que a los fluidos que presentan resistencia interna se los denomina viscosos, considerándose la viscosidad como una propiedad del medio fluido continuo. Aquí queda perfectamente ejemplificado el sentido de “propiedad” que adquiere el coeficiente de proporcionalidad puesto que queda presentado a través de variables tales como n , \bar{v} , m , ξ , que son propias de cada fluido bajo determinadas condiciones, lo cual estaría indicando también la importancia que presentan los modelos analógicos al momento de dar significado a propiedades. La presentación de la propiedad de viscosidad podría estar dada por ambas interpretaciones, pero sólo la *interpretación2* brinda un significado a la misma.

La *interpretación2* está resumiendo la analogía positiva y la analogía neutra que presenta el comportamiento de un gas diluido en movimiento cuando se traslada en forma de capas o laminas en relación al modelo de las esferas rígidas en movimiento con choques elásticos. La presencia de términos provenientes del modelo es lo que permitió que el significado del término *resistencia interna de un fluido* fuese evolucionando y

posibilitar la explicación de nuevos hechos observables. Los nuevos términos que fueron incorporados a la *interpretación*² permitieron, por similitud, proponer un nuevo concepto que permitió el desarrollo de nuevas teorías destinadas a explicar algunos de los hechos que surgían de un fenómeno como la turbulencia en el movimiento de los fluidos y que había comenzado a ser considerado científicamente. En particular nos referimos al término ξ “camino libre medio” que inspiró un concepto similar que fue utilizado para dar explicación de las tensiones tangenciales turbulentas o resistencia interna de un fluido en movimiento turbulento.

- **Análisis del concepto de longitud de mezcla**

En la sección dedicada al surgimiento de este concepto se ha dejado delineada una serie de ítems o aspectos, derivados de las condiciones establecidas por Hesse para el establecimiento de una analogía material, a los cuales nos ocuparemos en analizar.

La mayoría de ellos, explícita o implícitamente, ya fueron analizados con alguna extensión. Por lo tanto nos ocuparemos principalmente de determinar cómo pudieron estar conformados los grupos de analogía, en particular lo ocurrido con la longitud de mezcla y en desarrollar algunas conclusiones.

Con el *concepto de longitud de mezcla* se trató de explicar un determinado aspecto del movimiento turbulento de un fluido con el mismo modelo que dio origen a la teoría cinética de los gases y que ya resultaba familiar a la comunidad científica. La analogía establecida entre el camino libre medio y la longitud de mezcla se utilizó para proponer una teoría que explicara las tensiones tangenciales turbulentas.

Desde una perspectiva de la teoría de los modelos analógicos, para que este modelo tuviese vigencia en el estudio de este aspecto del movimiento turbulento de un fluido, pensando en su utilización para generar teorías, tendríamos que analizar qué ocurrió con el cumplimiento de las condiciones establecidas por Hesse, tarea ésta que ya hemos comenzado. Resumamos qué pudo haber ocurrido con las fuentes de conocimiento para el establecimiento del modelo.

Como *propiedades observadas* en el dominio de estudio de la turbulencia podríamos considerar, en función de lo ejemplificado con anterioridad, que el “incremento de caída de presión” observado, cuando se establecía el nuevo modo de movimiento en un líquido circulando en una cañería, se pudo haber asociado a un cambio en el coeficiente de viscosidad del fluido, también “incrementos de transferencia térmica” podrían ser

asociados a una modificación en los valores de propiedades tales como coeficientes de conductividad térmica, coeficientes de convección, etc. Estas observaciones presentaban un factor en común y es que la turbulencia produce una mejora notable, comparada con el movimiento laminar, en los procesos de transporte de las propiedades del fluido en toda la zona o región del espacio que se encuentra afectada por este modo complejo de movimiento; esto conduce a que se dispuso de un aspecto observable característico del fenómeno que indudablemente ejerció su influencia al momento de postular, por similitud, el concepto de longitud de mezcla, ya que recordemos que la propiedad de viscosidad fue tratada con la teoría cinético molecular como una propiedad de transporte donde el camino libre medio recorrido por las moléculas resultó importante para cuantificar esta propiedad. Retornando a las fuentes de conocimiento que hemos mencionado anteriormente esto último corresponde a la segunda fuente que propone Hesse, formada por las analogías observadas entre las propiedades que ya han sido observadas. Anteriormente hemos visto que pudieron ser pre-teóricas, esto nos permitiría afirmar la independencia de la identificación de las relaciones de similitud.

Veamos los grupos de analogía cómo pudieron estar conformados en este caso. La analogía positiva principalmente pudo estar constituida por el hecho de que tanto en el nuevo dominio del movimiento turbulento como en el conocido dominio del movimiento laminar existe un transporte y mezcla de propiedades, que fue modelado con éxito para el caso particular de los gases diluidos con el sistema de esferas en movimiento con choques elásticos.

También el camino libre medio resultó importante en la teoría cinética para poder decidir cuando la hipótesis de medio continuo podía ser aplicada o no. Con respecto a esto nos vamos a extender porque se vincula con la respuesta a la pregunta *¿en qué grupo de analogía podríamos incluir a la longitud de mezcla?*

El modelo que fue empleado para desarrollar la teoría cinética de los gases es un modelo que es esencialmente discreto, es un conjunto de n moléculas con n muy grande y en donde se hace la hipótesis del continuo justamente a partir del estudio de cosas como el camino libre medio. Supongamos que uno estudia propiedades características de los fluidos, entonces si la observación macroscópica de las propiedades del fluido, que pueden ser su densidad, temperatura, velocidad, presión, es tal que no es necesario conocer los detalles microscópicos de lo que está pasando con las partículas que forman el fluido parece lícito hacer una hipótesis que es la hipótesis del continuo, lo cual va a simplificar operativamente todo lo relacionado con el cálculo matemático, porque es

mucho más fácil hacer integrales que sumatorias de 10^{23} cosas, por ejemplo. Entonces, en principio es una hipótesis simplificatoria para poder operar matemáticamente y uno lo que supone es que las expresiones representadas por esos promedios que uno hace, porque en realidad uno está trabajando con entidades macroscópicas, no microscópicas, uno supone que los promedios que ha realizado están tan bien representados con un continuo como con un discreto que sería mucho más complicado al nivel del manejo matemático, para a su vez plantear ecuaciones o cosas por el estilo.

El camino libre medio ¿en qué entra en esto? En que si uno compara el camino libre medio, que es la distancia entre dos interacciones sucesivas de las distintas moléculas del fluido, con, por ejemplo, las distancias en las cuales se manifiesta un cambio significativo en la densidad del fluido o las dimensiones del recipiente en el que se encuentra el fluido, si el camino libre medio es mucho más pequeño que las otras dimensiones, entonces estamos en una situación donde considerar el discreto o el continuo es más o menos lo mismo.

¿Se puede decir que es esencial, con respecto al modelo, la hipótesis del continuo? La hipótesis del continuo es una hipótesis que se hace *a posteriori*, uno lo que tiene en cada situación a resolver son distintos parámetros característicos del fluido y del entorno en que se encuentra. Si esos parámetros están combinados en determinada relación entre sí, el camino libre medio entre ellos, entonces la hipótesis del continuo es perfectamente válida en el sentido de ser aplicable con mucha precisión. No introduce mayor error considerar un fluido como continuo o considerarlo desde el punto de vista de moléculas, es más, considerarlo como continuo va a servir para simplificar el tratamiento matemático. Entonces lo esencial no es la hipótesis del continuo, sino cómo están combinados los parámetros entre sí ¿Qué se quiere decir con esto? Por ejemplo, si el aire en una habitación estuviera constituido por 10 moléculas nada más y estuvieran separadas por una distancia del orden del metro, seguramente la hipótesis del continuo no sirve. Esta hipótesis sirve cuando las distancias entre las moléculas del aire son mucho menores que las distancias entre las paredes de la habitación o las distancias donde se puede observar cambios significativos de la densidad del aire entre una región y otra. Por ejemplo, hacer la hipótesis de que es posible considerar al aire como continuo es una hipótesis perfectamente válida. Pero eso se determina en función de los parámetros característicos que están combinados de manera tal que el continuo es una aproximación buena.

Aquí vale la siguiente pregunta: en el caso de la turbulencia, ¿los parámetros están combinados de una manera tal que el continuo es una aproximación válida o eso es lo que no se sabe al proponerse el concepto de longitud de mezcla?

Como respuesta podemos decir que a nivel histórico (1926) de la propuesta de la teoría de Prandtl, no se conocía si la longitud de mezcla guardaba una relación con otra longitud de manera que la hipótesis del continuo fuera aplicable.

Unos pocos años después, 1930, von Kármán presentó una escala de longitud del flujo medio ([28],p.44), en forma similar a la establecida en la teoría cinética, que al ser comparada con la longitud de mezcla permitía decidir de alguna manera la validez de esta hipótesis. Si bien esta longitud definida podía de alguna manera conocerse, el problema aquí resultaba que la longitud de mezcla era desconocida. Esto no ocurría en la teoría cinética, ya que por algún método uno tenía la posibilidad de conocer el valor del camino libre medio puesto que se encontraba relacionado con distintas propiedades, por ejemplo, con la temperatura o la presión del gas. Al poder conocerse todos los valores intervinientes en esta relación se podía decidir sobre la validez o no de la hipótesis del continuo.

Al momento de postularse la longitud de mezcla esto no ocurría. Lo concreto es que en el año en que surgió el concepto de longitud de mezcla no estaba claro que esta analogía, que Prandtl había establecido entre el camino libre medio y la longitud de mezcla, fuera tal que permitiera saber si la longitud de mezcla, con relación a alguna longitud característica, al diámetro de la cañería por ejemplo, eran tales que la hipótesis del continuo era aplicable o no. Esto resulta importante porque los resultados que se aplicaban provenientes de la teoría cinética resultaban válidos si lo era la hipótesis del continuo.

Si ahora volvemos a la pregunta *¿en qué grupo de analogía podríamos incluir a la longitud de mezcla?* Entonces la cuestión que acabamos de tratar permite sostener que este concepto se hallaba a un nivel de analogía neutra al momento de su propuesta.

Recordemos que la analogía neutra está formada por aquellas entidades, propiedades o relaciones en el nuevo dominio de los que no conocemos, en una cierta fase de la investigación, su pertenencia al grupo de analogía positiva o negativa. En este sentido podemos decir que se suponía la siguiente analogía neutra:

Dominio fuente	Explanandum
movimientos de esferas rígidas	movimientos de "partículas de fluido"
sin interacciones en su recorrido libre	sin interacciones en su longitud de mezcla

En esta similaridad se conjetura la presencia de “partículas de fluido” inobservables y se postula también la presencia de una longitud de mezcla también inobservable.

Se puede afirmar que algunas relaciones diádicas horizontales entre términos del nuevo dominio y del dominio previo sobre el cual estaba basado el modelo eran relaciones de similaridad a un nivel observacional y pudieron resultar pre-teóricas, particularmente nos referimos aquí a lo que se pudo haber detectado con el experimento de Hagen y que resultó anterior a la formulación de una teoría como la de Reynolds sobre el dominio en estudio. En el dominio familiar dijimos ya que las relaciones causales estaban bien establecidas, tanto si pensamos en el movimiento de las esferas o en el movimiento laminar que ya estaba bien fundamentado gracias al modelo anterior. Las condiciones 1 y 2 se cumplían, de manera que el modelo de alguna manera seguía teniendo vigencia para su empleo en el estudio de este nuevo dominio. Recordemos las condiciones establecidas:

Condición 1. Las relaciones diádicas horizontales entre términos deben ser relaciones de similaridad a un nivel observacional, donde la similaridad puede, al menos para propósitos de análisis, ser reducida a identidades y diferencias entre conjuntos de características o propiedades.

Condición 2. Las relaciones verticales en el modelo propuesto deben ser relaciones causales en algún sentido científico aceptable, donde no existen razones precisas *a priori* para negar que relaciones causales del mismo tipo pueden mantenerse entre términos del blanco (explanandum).

Condición 3. Las propiedades esenciales y las relaciones causales del modelo que sea propuesto no tienen que formar parte de la analogía negativa entre fuente y blanco.

El lograr determinar si la condición 3 se cumple o no, está relacionado con el conocimiento, posterior a la propuesta del modelo, que se obtenga del dominio estudiado en función de las consecuencias observacionales que se deduzcan por medio de las relaciones causales que rijan al modelo.

Por ejemplo podemos recordar lo que se explicitó cuando se habló de la teoría del funcionamiento ideal de las máquinas térmicas, en donde el modelo presentaba como una característica esencial el hecho de la conservación del fluido que se suponía seguía teniendo validez en el comportamiento del calor, ya que en esa etapa histórica se hallaba a un nivel de analogía neutra. Posteriormente, con experiencias sobre el nuevo dominio, para tratar de contrastar las consecuencias observacionales que se derivaban del

modelo, se pudo conocer que esta propiedad, atribuida al nuevo dominio, formaba parte del conjunto de analogía negativa.

En este caso particular relacionado a la turbulencia, no vamos a examinar el cumplimiento o no de la tercera condición, si bien se ha esbozado que lo que podría llegar a ser una propiedad o característica esencial es el cumplimiento de un cierto valor de alguna relación adimensional establecida por las variables que intervienen en el fenómeno. Esta tarea requeriría de un análisis mucho más detallado del fenómeno físico en sí. Simplemente nos hemos propuesto analizar lo ocurrido en el contexto de descubrimiento de una teoría, en este caso la teoría de Prandtl sobre las tensiones de Reynolds, la cual se vio influenciada por un concepto derivado de un modelo analógico.

En tal sentido podemos afirmar que la propuesta de este concepto, longitud de mezcla, pudo ser moldeada dentro del marco de la teoría de modelos analógicos constituidos sobre la base de una analogía material que propone Mary Hesse.

Conclusiones

La teoría cinética considerada desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos se presenta como un caso histórico que refleja la concepción sobre la estructura de las teorías científicas que mantiene Mary Hesse. Para Hesse afirmar una teoría es tener en cuenta tanto la analogía positiva como la analogía neutra, y donde la analogía asociada con una teoría no es meramente un mecanismo heurístico para facilitar la búsqueda de leyes adicionales, por el contrario la analogía es una parte esencial de la teoría debido a que sólo en términos de la analogía puede decirse que una teoría explica un conjunto de leyes. La explicación de leyes por medio de una teoría se consigue sólo mediante la formulación de una analogía con algún sistema gobernado por leyes previamente establecidas. Hesse mantiene la posición que, si una teoría tiene poder explicativo entonces exhibe una analogía con un sistema gobernado por leyes previamente establecidas, donde utilizar una analogía en la ciencia supone afirmar que existen dos tipos de relaciones entre el análogo y el sistema que ha de explicarse. El primero son las relaciones de semejanza entre las propiedades de la fuente y las propiedades del sistema que ha de explicarse. El segundo son las relaciones causales, o funcionales, que se mantienen tanto para el análogo como para el sistema que debe ser explicado.

Desde una perspectiva de la teoría de modelos analógicos recurrir a un modelo analógico permite afirmar que la postulación de una longitud de mezcla, "inobservable", se corresponde con la postulación de un término teórico. El empleo de la analogía, en este caso, está relacionado para pasar desde propiedades observables dadas a la *presentación* del término teórico, y por lo tanto luego a hipótesis involucrando el término teórico. Las hipótesis generadas de esta manera tienen la interesante particularidad que en estas oraciones junto al término teórico aparecen términos observacionales, permitiendo obtener consecuencias observacionales desde estas hipótesis. Hemos señalado anteriormente que Hesse considera que el término teórico puede ser considerado como una conveniente forma de resumir la analogía positiva y neutra en cualquier estado de la investigación lo cual se entendería que las presentaciones que se realicen de un término teórico irían cambiando a medida que se fuesen incorporando nuevos elementos a los grupos de analogía señalados, y como hemos tratado de ejemplificar en la primera parte de este trabajo este es uno de los puntos positivos que se tendría al trabajar con modelos analógicos sobre la base de una analogía material, lo importante de esto es que se tiene la posibilidad de que nuevas predicciones observables puedan ser realizadas al ir incorporando nuevos elementos a la analogía neutra.

La *justificación* del postulado del término teórico dependerá del éxito de las predicciones efectuadas con las hipótesis que con él se generen, y el *significado* del término es clarificado mostrando cómo se encuentra parcialmente presentado por los caracteres los cuales son compartidos con los correspondientes términos en el modelo².

Podríamos decir que Prandtl apreció el carácter y el significado de la observable y reconocida analogía entre el dominio fuente y el explanandum y con ello construyó un modelo¹ (analogía positiva más analogía neutra) basado en las relaciones causales de la fuente, similar al modelo utilizado para desarrollar la teoría cinética de los gases, y lo propuso como un modelo para explicar un sector del movimiento turbulento de un fluido, gobernado también por las mismas leyes. Con este modelo, utilizando el concepto de longitud de mezcla, exploró el nuevo dominio tratando de predecir la dinámica (esto es, aquellos aspectos que involucran fuerzas, como es en este caso el concepto de "tensión") del movimiento generado por la turbulencia. Esta dinámica produce lo que se dio a conocer como tensiones de Reynolds, fruto de una concepción fluctuante del movimiento. Pensemos o recordemos que hasta antes de 1930 los instrumentos sólo registraban valores medios de las propiedades no siendo sensibles a las fluctuaciones.

Hoy sabemos que las fluctuaciones están corroboradas, al poderse registrar por ejemplo a través de sensores de hilo caliente, lo cual indica la vigencia de las tensiones encontradas por Reynolds en 1895 a través de postular la descomposición de las propiedades en un valor medio más un valor fluctuante y a las cuales Prandtl trató de buscarles una explicación a través de un modelo analógico y de predecir sus consecuencias.

El concepto de longitud de mezcla fue generador de hipótesis ([anexo II]). Si bien hemos dicho que no vamos a analizar las consecuencias, que se derivan de la teoría generada con este concepto, y las corroboraciones que pudo o no haber tenido, existe un aspecto relacionado con el empleo de un modelo analógico que merece ser destacado.

Primeramente veamos una opinión vertida en la década del setenta, sobre esta teoría, casi medio siglo después de haberse propuesto esta teoría. Tennekes, H. expresa: “una teoría para las tensiones de Reynolds basada en el modelo de longitud de mezcla no se puede ajustar al modelo de la teoría cinética de los gases; el modelo de longitud de mezcla deberá ser rechazado, aún si bien una expresión derivada de la longitud de mezcla tiene buen sentido dimensional [...]”([28],p.50)

Aquí existe una situación similar a la ocurrida con el modelo fluido-calórico y es que estas teorías actualmente siguen apareciendo en los libros de texto, como teorías que de alguna manera permiten obtener algunas conclusiones que pueden ser corroboradas experimentalmente, si bien se aclara el carácter limitado que puedan poseer. Esto destacaría un aspecto positivo que tendría razonar con modelos analógicos científicos constituidos sobre la base de una analogía material para la búsqueda de una teoría y es que un modelo no queda desacreditado por tal o cual consecuencia falsa que pudiera tener, sino que, por el contrario, sigue siendo utilizado en el dominio que le es propio durante mucho tiempo después de descubrirse esa imperfección, podríamos decir metafóricamente que sigue esperando que alguien le descubra nuevas propiedades que correspondan al grupo de analogía neutra para seguir explorando sus consecuencias, desarrollando nuevas ampliaciones de las teorías existentes o bien nuevas teorías.

Cómo se generan y desarrollan las teorías fue una de las preguntas que estuvieron formuladas en este trabajo. Campos de conocimientos tan diversos como la evolución de las especies, la estructura interna de un átomo, el funcionamiento ideal de máquinas térmicas a vapor, la estructura interna de los gases, han tenido sus propias teorías y en todos ellos fue decisiva la presencia de campos previos de conocimientos bien

establecidos que sirvieron como fuente inspiradora e importante para el desarrollo de estas teorías.

El importante trabajo de Mary Hesse captura esta situación de cognición e incorpora un marco teórico que permite validar la transferencia de conocimientos desde estos sectores de la realidad bien conocidos con el objetivo de obtener conocimientos de nuevos sectores de la realidad, no en un sentido literal sino una realidad vista en forma analógica. La propuesta de Hesse es la de una aprehensión de la realidad a través de la analogía, pero la palabra inicial y el veredicto último siempre permanece en la reacción del sector de la realidad en estudio frente a las experiencias a que el hombre las somete.

Las pequeñas investigaciones realizadas a través de los distintos casos históricos presentados permite afirmar que la concepción sobre las estructuras de las teorías científicas que mantiene Hesse es encontrada en estos casos y que, si estos análisis son correctos entonces nos estaría ofreciendo sugerencias para el desarrollo futuro de teorías, pero por el momento sólo podemos afirmar que la teoría de modelos analógicos constituye una adecuada herramienta para pensar la estructura de teorías científicas y que el desarrollo de nuevas teorías siempre estará en manos de investigadores con una muy buena base experimental y con un alto grado de creatividad en sus trabajos.

Para quien recurra a la analogía hemos dicho que la identificación de similitudes entre el nuevo dominio y otros ya conocidos es una tarea que requiere gran creatividad, si bien las propuestas que resultan generalmente son simples. En el caso de la teoría cinético-molecular, el modelo analógico empleado generó distintos componentes que intervinieron en la explicación de las leyes ya conocidas de los gases en estado estacionario y en la explicación de la hipótesis de Newton sobre la resistencia interna de un fluido en movimiento. Estos elementos con el transcurrir del tiempo alcanzaron a ser tan familiares como las leyes experimentales que explicaron y de esta manera se habían convertido en potencial fuente de inspiración al momento de querer dar respuesta a nuevos fenómenos. En el caso de la turbulencia, la fuente de inspiración resultó el *camino libre medio*, el cual sugirió el nexo de similitud para la propuesta de otro concepto, el de *longitud de mezcla* y el cual ya hemos analizado.

Hemos visto que en este caso se trató de trasladar el mismo modelo que había logrado explicar la resistencia interna de un gas diluido en movimiento laminar para explicar la resistencia interna de un fluido en movimiento turbulento.

Si pensamos en hacer una comparación de la evolución del término resistencia interna de un fluido, o bien tensión tangencial laminar, con las interpretaciones presentadas para

el término calor, podríamos decir lo siguiente: en el caso del término calor estamos tratando desde un comienzo con la presentación de un término teórico puesto que se le está tratando de asignar una “realidad” en forma analógica presentándolo como si fuese un fluido y asignándole propiedades y efectos observables similares a los producidos por un fluido; aquí la intervención de un modelo analógico ocurre desde un inicio, la inclusión de distintas propiedades del fluido en los grupos de analogía permitió que el término teórico fuese evolucionando en su interpretación.

En el caso de la resistencia interna de un fluido nos encontramos en un comienzo con la ausencia de un modelo y esto resultaría típico de las leyes experimentales y oraciones de segundo nivel ya que sus términos son todos observacionales, la hipótesis de Newton expresa el comportamiento de la resistencia interna que resulta observable frente a determinadas condiciones experimentales a que es sometido un fluido. La presencia del modelo ocurrió cuando se encontró la imposibilidad de observar algo “directamente”, tal como el mecanismo de interacción ejecutado por la materia fluida, en este caso la presencia de un modelo fue y es decisiva para dar una interpretación de estos mecanismos, con el modelo estamos “viendo” el comportamiento interno “como si fuese” idéntico o similar a lo que ocurre con el modelo que siempre es observable.

En ambos casos históricos de formación de conceptos se detectó que las analogías establecidas se corresponden con una analogía material con la presencia de propiedades que pueden clasificarse en los tres grupos componentes de la analogía material. Los componentes de la analogía neutra en ambos casos participaron en una manera significativa al momento de la presentación de términos teóricos y al momento de tener que producir hipótesis.

Conclusiones adicionales:

La analogía material y la aprehensión de la realidad

En general se ha tomado como unidad de análisis a la teoría científica, y si pensamos en los contextos sobre los cuales se podrían plantear los análisis los podríamos clasificar en: 1) un contexto de descubrimiento, o cómo surgen y desarrollan las teorías 2) un contexto de justificación y 3) un contexto de aplicación.

Para el análisis de teorías científicas se utilizó otra “teoría o meta-teoría” (la de los modelos analógicos) que nos propone un marco o una forma de transferencia de

conocimientos *desde* un sector de la realidad, de alguna manera conocido científicamente, *hacia* un nuevo sector en estudio.

Una investigación científica en un nuevo sector de la realidad que se someta a estudio comienza con una o varias preguntas. Las hipótesis “son respuestas que se proponen” a los problemas que dieron lugar a la investigación, y estas hipótesis son las que dan lugar a una teoría científica ([10], pp.29-30). Las hipótesis, como dijimos, son textos que alguien enuncia y que está en “estado de problema”, en el sentido de no conocerse su verdad ni su falsedad en el momento de su formulación, pero que pese a ello se supone verdadero.

Lo que ha sido analizado, con la ayuda de la teoría de los modelos analógicos, corresponde en gran medida al contexto de descubrimiento de las teorías científicas, esto es, la forma en la cual una nueva teoría surge en el ambiente científico. Se pretendió mostrar la importancia que adquiere la analogía material como elemento generador de hipótesis y que posibilita un crecimiento o desarrollo dinámico de las teorías establecidas por este medio.

Se puede decir que construir una teoría con el objetivo de captar la dinámica de *un sector* de la realidad consiste en postular analógicamente, con el empleo de una analogía material, un dominio de entidades no observables y lograr correlacionar los distintos comportamientos y propiedades de estas entidades teóricas con ciertos comportamientos de objetos no-teóricos o situaciones conocidas que resulten observables o, al menos en principio, describibles en términos observacionales.

Recordemos que se define analogía material como aquellas ***analogías preteóricas entre observables “materiales”*** las cuales habilitan a que las predicciones sean hechas desde un modelo. Establecer una analogía material requiere disponer de hechos u objetos que se comporten de manera observable y que sirvan como elementos para estudiar nuevos hechos que se producen en la realidad o mundo donde vivimos. Lo que podríamos exigir a los elementos pertenecientes a esta base empírica, en forma adicional a las tres condiciones que propone Hesse, es una serie de requisitos tales como ([18], pp.47-51):

- ***efectividad***: esto es, que sea decidible si el objeto o hecho en cuestión tiene rasgos observables o no los tiene
- ***objetividad***: para que un cierto dato sea observable, lo debe ser para distintos observadores.

- *repetibilidad* si se toma como elemento un evento, entonces bajo las mismas condiciones debe producirse un hecho similar.

Estos requisitos resultarían necesarios para poder asegurar una correspondencia entre elementos de la fuente y elementos del blanco.

Se ha tratado de poner de manifiesto, a través de distintos casos históricos, que el “postular analógicamente” utilizando una analogía material conduce a que las entidades que uno podría estar proponiendo o suponiendo su existencia no resulten totalmente “arbitrarias” sino que presentan una cierta base racional puesto que se las está “viendo” a través de entidades que ya se encuentran aceptadas por la comunidad científica y que muchas veces constituyen un conocimiento “socializado” en el sentido que ha trascendido los límites del ambiente de los investigadores y se ha producido su transmisión a la sociedad a través de la instrucción profesional en institutos educativos. Los nuevos investigadores que van surgiendo y que adquieren este conocimiento socializado poseen una cierta capacidad potencial de aprehensión analógica de las nuevas realidades a explorar. La aprehensión analógica de la realidad se ve entonces favorecida cuando el conocimiento científico previo ha tenido una fase de socialización, esto conduce a que *la ciencia se presente como algo continuo con el lenguaje común* en aquellos casos que se genere conocimiento de esta manera, ya que la forma en la cual algunos científicos buscan explicar los fenómenos empíricos se constituyen en refinamientos de las formas en las cuales el conocimiento de distintos sectores de la realidad es familiar a los hombres.

Hablar de la construcción de una teoría como la elaboración de un sistema de hipótesis analógicamente correlacionado con un discurso observacional previo se presenta como un cuadro que parece altamente artificial y no realista de lo que los científicos hacen en el proceso de construcción de una teoría; sin embargo lo que aquí de alguna manera se trató de mostrar es que si se emplea la analogía material como medio de transferencia y generación de nuevos conocimientos entonces esta manera de elaborar un sistema de hipótesis presenta una determinada fundamentación racional ya que históricamente aparece implícitamente como una forma común de pensar, o por lo menos los casos que se alcanzaron a analizar se corresponden con el esquema de los modelos analógicos de Hesse.

Para nada se niega que científicos con una excelente base lógica o formal pudieron y puedan proceder en un estilo verdaderamente lógico o formal para la construcción de teorías, sin embargo se puede afirmar lo siguiente, lo cual surge de los distintos casos

históricos presentados: *las hipótesis fundamentales de una teoría son usualmente desarrolladas no por construcción de un cálculo sin interpretar el cual podría correlacionarse en la manera deseada con el discurso observacional, sino más bien intentando encontrar un modelo analógico basado en analogía material, esto es intentando describir un dominio de objetos familiares comportándose en formas familiares tales que con esta descripción podamos ver cómo los fenómenos a ser explicados podrían surgir si ellos consistiesen de tal clase de cosas.*

El contexto o nivel de justificación de una teoría fue también analizado donde se manifestó la importancia que adquiere la falsación al momento de evaluar, a través de consecuencias observacionales y observaciones pertinentes, las hipótesis generadas, permitiéndonos de esta manera conocer cómo *no es* la realidad o bien “seguir creyendo” en estas hipótesis y producir nuevos conocimientos. Disponemos por lo tanto, como elemento para juzgar sobre la validez de lo construido, del marco lógico asociado con el Método Hipotético-Deductivo, el cual describe la práctica efectiva que se da en la ciencia. La deducción es uno de los métodos científicos para producir nuevos conocimientos; es una herramienta que sirve para explicar y predecir. Deducción significa un razonamiento correcto. Un razonamiento es una sucesión de proposiciones donde las primeras son las premisas o hipótesis y la última es la conclusión, y todo este procedimiento, si el razonamiento es correcto, garantiza la conservación de la verdad. Si nos preguntaran ¿porqué es importante el razonamiento? podríamos decir que en ciencia resultaría demasiado caro hacer una investigación para estudiar la verdad de cada oración, en consecuencia se producen hipótesis (las que se suponen verdaderas) y de estas hipótesis, a través de la deducción, se deducen consecuencias observacionales, las cuales son enunciados singulares con contenido empírico, y como han sido producidas a través de un razonamiento correcto esto trae como resultado que las o la consecuencia obtenida es verdadera (en un sentido lógico si las premisas lo son) y en esta etapa estamos listo para someterla a una confrontación con la realidad. Aquí decimos que las consecuencias observacionales se testean por medio de una observación pertinente. Ésta puede provenir de un fenómeno natural o de un fenómeno provocado experimentalmente con la cual se trata de responder a la pregunta ¿Qué valor (verdadero o falso) tendrá la consecuencia observacional? Como resultado de esta operación si la consecuencia observacional es corroborada mediante las observaciones pertinentes entonces podemos seguir manteniendo el sistema de hipótesis como “si fuesen verdaderas” para seguir produciendo conocimiento; si la consecuencia observacional resulta falsa (como lo ha

indicado la experiencia) entonces la hipótesis de partida es falsa y ha quedado refutada, en ésta última instancia sí podemos asegurar que el sector en estudio no es como se propone en la hipótesis, como nos faculta a afirmar la regla lógica del Modus Tollens ([24],pp.72-74) ([10], p.22).

Si A	entonces	B	Hipótesis(A) \Rightarrow consecuencia observacional (B)
no		B	Resultado de la operación de contrastación

no		A	Conclusión: hipótesis falsada

Si queda refutada, la hipótesis no sirve más, pero existe conocimiento porque sabemos mejor *cómo no es* el sector de la realidad que estamos estudiando. Si las hipótesis de partida son varias y por medio de un testeo a través de una observación pertinente descubrimos que la consecuencia observacional es falsa, entonces no podemos asegurar cuál de las hipótesis es la falsa; muchas veces se recurre a reemplazar alguna de las hipótesis empleadas, y aquí es donde nuevamente es importante el rol que juega el producir hipótesis a través de un modelo analógico material, ya que como se ha puesto de manifiesto las hipótesis de reemplazo provienen de un conjunto de analogía neutra, con las ventajas ya destacadas.

Por lo tanto, con el empleo de la analogía material estamos incorporando una forma racional de producir hipótesis a partir de las cuales se sacarán consecuencias derivadas de las deducciones que se realicen. Producir(prededir) - probar - explicar - sistematizar: éstas son las ventajas del sistema hipotético deductivo a las cuales debemos incorporar las ventajas provenientes de la analogía material.

El método hipotético deductivo también explica. Cada vez que un científico realiza una explicación de una sucesión de acontecimientos particulares, está empleando el método hipotético deductivo. Explicar y predecir corresponde a fenómenos de la naturaleza, sean naturales o provocados por el hombre. En las ciencias formales no se dan explicaciones, porque no nos encontramos con fenómenos; sí se dan deducciones. Decir en qué consiste la explicación de un hecho observado puede ser convenientemente resumido afirmando que las respuestas a preguntas que involucren un *¿porqué?* requieren respuestas a cuestiones de *cómo* y *qué*. Así si preguntamos *porqué* algo ocurre, debemos mostrar *cómo* algún evento o cambio nos conduce a un nuevo estado de las cosas, describiendo la forma en la cual las estructuras y mecanismos que están

presentes responden al cambio inicial. Para hacer esto es necesario descubrir *cuáles* son las entidades involucradas: esto es descubrir su naturaleza o esencia. Podemos decir que, adecuadas explicaciones causales requieren el descubrimiento tanto de las relaciones regulares entre los fenómenos como de algún tipo de mecanismo que los una. Así, en la explicación de cualquier fenómeno particular, debemos no solo hacer referencia a aquellos eventos los cuales inician el proceso de cambio sino que también debemos dar una descripción del proceso mismo. Para hacer esto, necesitamos del conocimiento de los mecanismos subyacentes y las estructuras presentes, y de la manera en la cual ellas generan o producen el fenómeno que tratamos de explicar. Al describir estos mecanismos y estructuras lo que estaremos haciendo, es caracterizar la “naturaleza”, “esencia”, o “constitución interna” de varios tipos de entidades.

Las teorías científicas nos habilitan a dar explicaciones causales de fenómenos observables por su descripción de estructuras y mecanismos que están más allá de la observación (aún si incluimos como observables aquellos ítems los cuales pueden ser detectados por los instrumentos disponibles). Lo que resulta observable son las consecuencias que se derivan de los procesos dinámicos ejecutados por estas entidades “invisibles” que se postulan analógicamente.

Volviendo al discurso de la ciencia, esto es su faz lingüística, nos encontramos con términos que se pueden clasificar en términos lógicos, tales como: *y*, *si-entonces*, *o*, y en términos descriptivos. Entre los descriptivos nos encontramos con términos empíricos y términos teóricos, donde estos últimos son los que hacen referencia a entidades no-observables. Generalmente se considera que estos términos teóricos son problemáticos pues no se le encuentra una respuesta clara a la siguiente cuestión: ¿qué significan los términos teóricos?

Aquí podemos comenzar a responder de la siguiente manera: siempre se pueden utilizar términos teóricos y existen en ciencia muchas situaciones donde los podemos encontrar designando entidades no-observables. A través del análisis presentado a lo largo del texto podemos afirmar que la presentación de términos teóricos por medio de un modelo analógico constituido sobre la base de una analogía material tiene la ventaja de marchar hacia el descubrimiento, y esto no es poca cosa si recordamos que la práctica científica busca este objetivo.

También podemos decir que *la distinción entre* el discurso teórico y el discurso observacional se encuentra involucrado en la “lógica” que corresponda a episodios

internos en la construcción de la teoría, en el sentido que los conceptos catalogados como términos teóricos están relativizados a una teoría particular.

En teorías construidas por medio de analogía material los términos teóricos que resultan lo son con respecto al modelo particular involucrado porque ellos sólo pueden ser adquiridos con la ayuda de este modelo, y además es quien le otorga un significado analógico al término teórico.

Otros aspectos epistemológicos de relevancia han quedado sin analizar, pero lo presentado y analizado hasta aquí pretende reflejar la importancia que adquiere la concepción asumida en la cual se realiza una aprehensión analógica del sector en estudio. La presentación de los dos conceptos como casos de estudio, surgidos del estudio de la física de fluidos, indica que esta forma de concebir hipótesis para desarrollar teorías implícitamente ha sido empleada por científicos y el marco teórico propuesto por Hesse ha sido útil para realizar el análisis relacionado a la generación analógica (analogía material) de estos conceptos. Podemos decir que queda abierta la esperanza de que nuevos conocimientos puedan surgir transitando el camino analizado puesto que la generación de conocimientos por este método presenta aspectos interesantes y relevantes al conocimiento científico.

Sobre la teoría de modelos analógicos como un medio adecuado para el análisis de teorías científicas

Seguidamente destacaremos aspectos por los cuales *la teoría de modelos analógicos es una adecuada herramienta para el análisis de teorías científicas*. Sobre la base de las teorías presentadas en los distintos ejemplos y en las cuales se ha detectado la intervención de un modelo analógico basado en una analogía material, podemos afirmar que la teoría de modelos analógicos de Hesse permite analizar la estructura de teorías científicas por lo menos en los aspectos siguientes:

1. poniendo de manifiesto que una tarea de las teorías consiste en describir estructuras subyacentes al fenómeno o sector de la realidad en estudio y los mecanismos funcionales, involucrados en esta estructura, que logran producir los efectos observables que estamos tratando de explicar y predecir; estructuras y mecanismos ambos generalmente inobservables y que con la ayuda de un modelo y de las relaciones causales que rigen el comportamiento de sus propiedades componentes tenemos la oportunidad de poder “visualizar” en una forma analógica. El modelo permite lograr una aprehensión analógica

de la realidad pero que no la convierte en arbitraria porque con esta interpretación somos capaces de producir modificaciones en el sector de la “realidad “ en estudio.

2. Dando respuesta a la pregunta ¿cómo acceder a enunciados de tercer nivel? Este tipo de modelo permite hacer el “salto” desde enunciados de segundo nivel a enunciados de tercer nivel, y lo que es importante es que los enunciados de tercer nivel que resultan son *mixtos*, poseen a la vez términos teóricos y términos empíricos; la producción de enunciados mixtos es sumamente importante porque brindan una conexión con el terreno de lo observable. Al ser utilizados como premisas en una teoría se obtiene a través de ellos consecuencias observacionales. Esto es importante porque es en el terreno de lo observable a través de las experiencias o de la presentación del fenómeno en forma natural donde se ejerce la función de control para las teorías y donde se dirime la cuestión de la validez o no de los enunciados de tercer nivel.

3. Asociando el carácter dinámico que presentan las teorías científicas basadas en modelos analógicos con la presencia de un grupo de analogía neutra. Este grupo se constituye en una fuente potencial de donde extraer hipótesis de trabajo y que dan el carácter evolutivo al significado de los enunciados de tercer nivel y en consecuencia a las teorías las cuales resultan “fuertemente” predictivas.

4. Con el ítem anterior podría estar dando respuesta a porqué las teorías cuando son falsadas no son abandonadas, sino que se las trata de mantener incorporando o reemplazando términos.

Observaciones sobre las fuentes de conocimiento

Dijimos que las fuentes de conocimiento provienen de fenómenos observables conocidos y fundamentados científicamente que ayudan a construir un modelo analógico con el cual podemos describir y predecir el comportamiento del nuevo dominio.

Aquí se está mencionando *la observación* como mecanismo de obtención de conocimiento, lo cual podría hacer pensar que es una posición inductivista por enumeración, pero se ha mostrado que esto no es así. El rechazo a esta posición lo efectuamos al considerar que el inductivismo no puede acceder a enunciados de tercer nivel, en cambio sí lo puede hacer el empleo de modelos analógicos basados en analogía material.

Es importante tener en claro que en este caso la significación que se le da a las observaciones está incluyendo aspectos cognitivos que involucran la presencia de una fundamentación científica previa de lo observado (carga teórica de lo observado) y un nexo cognoscitivo entre dominios observados, como lo es la captación o suposición de similitudes. La captación de similitudes pre-teóricas da origen a un modelo analógico que con la presencia de un grupo de analogía neutra nos permite acceder a enunciados mixtos de tercer nivel.

La forma de extraer o transferir conocimiento de algún campo de conocimiento ya establecido reposa sobre estos dos pilares: el conocimiento de propiedades observadas científicamente ya aceptadas y la analogía. En particular la analogía no constituye una forma infalible de transferir conocimientos desde un dominio a otro que se esté investigando y puede conducirnos a errores. La cuestión de las fuentes u origen del conocimiento es entonces cambiada por otra cuestión como la siguiente: ¿existe una forma de detectar y eliminar el error que pueda surgir al adoptar el conocimiento proveniente del empleo de esta analogía? Ésta fue la pregunta que estuvo implícita y que condujo como respuesta a considerar al método de la falsación como soporte lógico para la validación del empleo de teorías desarrolladas en función de modelos analógicos basados en analogía material, con este método uno detecta errores y la presencia del modelo analógico con un grupo de analogía neutra da la posibilidad de corregir y eliminar errores. Por lo tanto podríamos estar pensando que las fuentes desde donde transferir conocimientos van a resultar muchas, y quizás no tengamos conocimientos de todas, lo que sí es importante es que siempre vamos a disponer de un medio de control para saber si lo propuesto es útil para el estudio de un determinado sector de la realidad.

Podemos concluir que el desarrollo de teorías con el empleo de los modelos analógicos basados en analogía material supone que el conocimiento no puede empezar de la nada, ni tampoco de la sola observación. El avance de nuestro conocimiento consiste en la modificación y corrección del conocimiento anterior. En ocasiones es posible avanzar mediante observación o mediante un descubrimiento causal; pero el mayor valor y significación de una observación radica en establecer si nos permite modificar las teorías existentes, y esto lo podemos estar obteniendo con este tipo de modelos analógicos.

Ejemplo de analogía formal

Históricamente nos encontramos con una analogía formal entre dos dominios, el de la conducción de calor y el del movimiento de un fluido viscoso, que fue utilizada para transferir conocimiento de un dominio a otro. Por ejemplo Rayleigh (1880) ([19],p.590) identificó una analogía entre la ecuación mencionada del movimiento viscoso de un fluido

$$(\rho) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

con la ecuación de conducción de calor

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Estableciendo las condiciones apropiadas para que los dos primeros términos del segundo miembro de la ecuación de movimiento se anulen entonces queda establecida la siguiente analogía formal

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

donde u se hace corresponder con T y $\frac{\mu}{\rho}$ con K , estando cada uno de los términos perfectamente identificados en sus significados físicos. Las soluciones conocidas del problema de conducción de calor fueron transferidas para resolver problemas de movimiento fluido.

Aquí hay un aspecto que es interesante hacer destacar en el empleo de la analogía, y es una relación que queda establecida temporalmente entre analogía material y analogía formal. Recordemos que Fourier estableció las ecuaciones de conducción de calor empleando una analogía con el movimiento fluido lo cual puede ser considerado como una analogía material. En el caso mencionado de Rayleigh se está procediendo en manera inversa en el uso de la analogía, es decir Fourier transfería conocimiento de los fluidos para estudiar el nuevo dominio del calor y Rayleigh utilizó conocimientos del dominio de conducción de calor para obtener ciertos conocimientos en el dominio fluido.

En la primera parte de este trabajo dijimos que "lo que resulta característico en analogía formal es que las relaciones de similaridad entre análogos no pueden ser

identificadas sin el conocimiento previo de las relaciones entre términos de cada análogo”, volviendo al ejemplo ahora planteado podríamos decir que Rayleigh pudo encontrar la analogía formal porque conocía cual era el significado de cada término que se debían anular para lograr la identidad en forma de las ecuaciones y así realizar la transferencia de conocimiento por intermedio de las relaciones de similitud detectadas.

Anexo II

Teoría de PRANDTL

A los efectos del estudio del flujo "unidimensional" de un fluido por el interior de una tubería, la expresión de Reynolds de los esfuerzos cortantes turbulentos nos bastaría si ella arrojará efectivamente un valor para τ_{turb} . Pero las pulsaciones u'_x , u'_y son desconocidas y, constituyen unas incógnitas adicionales a las que aparecen en la teoría del flujo laminar. Prandtl propuso una interpretación que permite eliminar esas incógnitas, siempre que se acepten una serie de hipótesis que vamos a presentar seguidamente. Considérese para ello un flujo unidimensional turbulento, con una velocidad media temporal u_x la cual cambia su valor cuando nos movemos en forma normal a la dirección del movimiento. La velocidad de las distintas capas se considera variable, por lo cual simbólicamente podemos expresar

$$u_x = u_x(y)$$

donde u_x representa la componente de la velocidad de una partícula que se desplaza según una dirección x , "y" estaría representando una distancia normal al movimiento.

Debido a la turbulencia existe una transferencia lateral de fluido entre una capa localizada en "y" con una capa vecina ubicada a una distancia L de la misma. La velocidad en esta última capa se puede aproximar de la siguiente manera

$$u_x(y + L) = u_x(y) + L \frac{du_x}{dy} + \dots$$

según la conocida fórmula de Taylor, considerándose con esto que la distancia L es relativamente pequeña.

Prandtl presenta el concepto de longitud de mezcla considerando que la longitud L es tal que una partícula de fluido que pasa de la primer capa ubicada en la posición (y) a la segunda capa ubicada en la posición ($y+L$) llega a esta última capa sin haber perdido sus características propias, en particular su velocidad.

Prandtl luego propone la siguiente hipótesis que involucra al concepto teórico de longitud de mezcla.

1° Hipótesis La partícula sale de una capa con una velocidad $u_x(y)$ y al llegar a la segunda capa donde todas las partículas de la misma tienen una velocidad distinta y que se ha indicado como $u_x(y+L)$, la partícula visitante constituye un medio de perturbación en la capa de fluido de llegada. Hizo entonces la hipótesis que la diferencia de velocidades entre capas

$$u_x(y+L) - u_x(y) = L \frac{du_x}{dy}$$

es justamente lo que, en la segunda capa, puede considerarse una pulsación o perturbación. Esto es, postula que

$$u'_x = L \frac{du_x}{dy}$$

donde u'_x representa al valor de la pulsación.

2° Hipótesis Con respecto a la pulsación transversal u'_y , Prandtl postuló que, por razones de continuidad, las dos pulsaciones u'_x y u'_y han de ser del mismo orden de magnitud, y de signo contrario, o sea

$$u'_y = -u'_x$$

Si estas expresiones se introducen en la fórmula de las tensiones tangenciales turbulentas, obtenidas por Reynolds, se deduce:

$$\tau_{\text{turb.}} = -\overline{\rho \cdot u' \cdot v'} = \rho \cdot L \cdot \frac{du_x}{dy} \cdot L \cdot \frac{du_x}{dy}$$

reordenando términos

$$\tau_{\text{turb.}} = \rho \cdot L^2 \cdot \frac{du_x}{dy} \cdot \frac{du_x}{dy}$$

Esta expresión presenta el inconveniente de que la longitud de mezcla es también desconocida. Con toda seguridad L depende de la variable y , pero no se conoce esta función. Sin embargo presenta la ventaja enorme que hace depender las tensiones tangenciales turbulentas del flujo medio, a través del término $\frac{du_x}{dy}$, y por consiguiente constituye un paso adelante hacia la determinación de dicho flujo. En cuanto a la dificultad todavía presente de conocer L , de nuevo se requieren hipótesis adicionales, que han sido propuestas de distintas maneras según el problema concreto que haya que resolver ([26], pp. 348-350).

Referencias

Las fechas incluidas entre corchetes se refieren a la primer edición.

- [01] Boido Guillermo, Flichman Eduardo H., Yagüe Jorge y colab. *Pensamiento científico-* Vol.1, CONICET, 1988, pp. 106-116.
- [02] Bridgman, P. *La Logica della Fisica Moderna*, Einaudi, Italia, 1952, pp. 62-68.
- [03] Brun E.A. et al. *Mecánica de los Fluidos*, Labor, Barcelona, 1980, Vol.2
- [04] Curtiss Ch. F. et al. *Molecular Theory of Gases and Liquids*, Edit. J. Wiley & Sons, E.U.A., 1954.
- [05] Darwin, Ch. *El origen de las especies*, Edit. Planeta, Barcelona, 1992, [1859].
- [06] Duncan W.J. et al. *Mechanics of fluids*, Editorial E. Arnold, U.K., 1978.
- [07] Einstein A., Infeld L. *La evolución de la Física*, Salvat, Barcelona, 1993, [1938].
- [08] Enriques Federico. *Problemas de la ciencia*, E. Calpe, Buenos Aires, 1947
- [09] Grau Vidal, F. X., “Experimentos numéricos en turbulencia homogénea, no isotrópica y bidimensional”, *Rev. Inter. de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, Vol.9, 1, 59-90 (1993) Univ. Politéc. Cataluña, España.
- [10] Hempel Carl G, *Filosofía de la Ciencia natural*, Alianza editorial, Madrid, 1973, pp. 16-56, pp. 75-125.
- [11] Hesse, M. *Models and analogies in science*, Sheed and Ward, London, 1966.
- [12] Hesse, M. “Theories, family resemblances and analogy”. En: Helman (ed.), *Analogical Reasoning*, Kluwe, Dordrecht, (1988), pp. 317-340.
- [13] Holman J.P., *Heat Transfer*, p.249., McGrawHill, 1990, [1963], E.U.A

- [14] Huxley, J. *Darwin*, Salvat, Barcelona, 1985, pp. 95-105, pp.143-147.
- [15] Jeans J.H., *The Dynamical Theory of Gases*, Dover Publ., E.U.A., 1954, [1916].
- [16] Jeans J.H., *Historia de la Física*, Fondo Cultura Económica, Méx, 1960.
- [17] Keat, R. *Social Theory as Science*, Routledge, U.K, 1982, pp. 27-45.
- [18] Klimovsky, Gregorio. *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, A-Z editora, Argentina, 1994, pp. 47-51, pp.129-141.
- [19] Lamb Horace. *Hydrodynamics*, Cambridge ,1932.
- [20] Malvern Lawrence E., *Introduction to the mechanics of a continuous medium*, Prentice-Hall,E.U.A., 1969.
- [21] Milic Capec. *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Tecnos, Madrid, 1973.
- [22] Nagel, E. *La Estructura de la Ciencia*, Paidós, Barcelona, 1993 [1961], pp.109-17.
- [23] Newton Isaac. *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*, Edic. Altaya, Barcelona -España-, LibroII - SecciónIX -pp.444-457 , 1997, [1687].
- [24] Popper, Karl R. *La lógica de la investigación científica*, REI, Argentina, 1989, pp. 27-47, pp. 76-88, pp. 72-74.
- [25] Reif, F. , *Física Estadística*, Reverté, Barcelona, 1975, p. 342.
- [26] Roca Vila. *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*, Limusa, México, 1980.

- [27] Smith, C. "Energy". En: Cantor G. et al (ed.), *Companion to de History of Modern Science*, Routledge, London, 1990, pp.326-339. 81014
- [28] Tennekes, H. and Lumley, J.L., *A first course in turbulence*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1972.
- [29] Toulmin, S. y Goodfield, J. *La Trama de los Cielos*, EUDEBA, Bs. As., Cap. IX - pp.259-283, 1963.
- [30] White Frank M., *Mecánica de Fluidos*, Mc. Graw-Hill, Madrid, 1983.
- [31] Wilson, S.S. "Sadi Carnot", *Investigación y Ciencia*, N°61, (1981), pp.106-116.



Joujeau

U.N.R.C.
Biblioteca Central



47613

47613