



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

**PROGRAMA DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y
TECNOLÓGICO PARA LA SOCIEDAD**

**“Experimentos pensados y movilidad de
conocimientos: Un estudio con profesores
de física del nivel secundario”**

TESIS

Que presenta

José Manuel Ruvalcaba Cervantes

Para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS
EN DESARROLLO CIENTÍFICO Y
TECNOLÓGICO PARA LA SOCIEDAD**

Directores de Tesis:

Dr. Ricardo Quintero Zazueta

Dra. Alma Adrianna Gómez Galindo

Ciudad de México

FEBRERO 2020

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que por medio del programa de becas me permitió desarrollar mis estudios de

Doctorado.

Becario 369430

Agradecimientos

A todas las personas que contribuyeron a materializar el trabajo en este escrito. Carezco de palabras con el poder poético y narrativo para expresar mi más sincero reconocimiento a tantas personas; desde quienes participaron brindándome su apoyo administrativo, asesoría técnica, hasta los más allegados académica y emocionalmente: esposa, madre, hermanos, directores de tesis y comité de evaluación. Gracias por siempre creer en mí, gracias por valorar el trabajo.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 EXPERIMENTOS PENSADOS EN FÍSICA	11
UNA DEFINICIÓN DE EXPERIMENTO PENSADO	11
EXPERIMENTOS PENSADOS DE FÍSICA EN EL ÁMBITO EDUCATIVO	16
EXPERIMENTOS PENSADOS ENTRE LA DIDÁCTICA Y LA EPISTEMOLOGÍA DE LA FÍSICA	23
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. LOS PROFESORES DE FÍSICA Y SUS EXPERIENCIAS CON LOS EXPERIMENTOS PENSADOS	299
2.1 LOS PROFESORES DE FÍSICA COMO EXPERIMENTADORES MENTALES	30
2.2 COGNICIÓN ENRAIZADA EN EL CUERPO Y EXPERIMENTOS PENSADOS	355
2.3 EXPERIMENTOS PENSADOS, REPRESENTACIONES IMAGINARIAS E INTUICIÓN FÍSICA	39
2.4 VERBALIZAR Y EXPLICITAR AL EXPERIMENTAR EN EL PENSAMIENTO	44
2.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	47
2.5 PROPÓSITOS	48
2.6 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	48
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO. NATURALEZA DE LOS EXPERIMENTOS PENSADOS EN FÍSICA	51
3.1 LA TRADICIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN EN EL PENSAMIENTO	52
3.2 EXPERIMENTOS PENSADOS EN FÍSICA	57
3.3 EL EXPERIMENTO PENSADO COMO MODELO MENTAL	62
3.4 LA MOVILIDAD DE CONOCIMIENTOS	70

3.5 LO QUE NO SON LOS EXPERIMENTOS PENSADOS EN FÍSICA	75
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA Y ESTUDIO INICIAL	77
4.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	79
4.2 ESTUDIO INICIAL	81
4.3 IMPLICACIONES DEL ESTUDIO INICIAL PARA EFECTUAR AJUSTES METODOLÓGICOS	101
4.4 PARÁMETROS DE MOVILIDAD DE CONOCIMIENTOS	106
CAPÍTULO 5 FASE FINAL DEL ESTUDIO	109
5.1 REPERTORIO DE EXPERIMENTOS PENSADOS	111
5.2 ENTREVISTA RETROSPECTIVA	115
5.3 REPORTES VERBALES	119
5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS PARTICIPANTES	121
5.5 ANÁLISIS DE LOS REPORTES VERBALES	122
CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE LA FASE FINAL E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	125
6.1 FASE 1. MODELOS MENTALES MOVILIZADOS	127
6.2 FASE 2. ACCIONES IDENTIFICADAS AL EXPERIMENTAR EN EL PENSAMIENTO	134
6.3 FASE 3. INTERPRETACIÓN DE LOS REPORTES VERBALES	140
6.4 MOVILIDAD DE CONOCIMIENTOS	142
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	145

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
ANEXO 1 MANUSCRITO REVISTA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS	161
ANEXO 2 EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE LA ETAPA 2 DE INVESTIGACIÓN	202
ANEXO 3 EJEMPLOS DE ANÁLISIS FASE FINAL DE INVESTIGACIÓN	215

RESUMEN

Los profesores de física al experimentar en el pensamiento emiten conclusiones no inferidas de procesos mentales de experimentación, y el conocimiento científico formal se manifiesta desligado del saber perceptual. En el trabajo se conjetura un modelo de acciones cognitivas al movilizar conocimientos en el contexto de experimentos pensados sobre caída libre, el cual podría explicar la falta de vínculo entre procesos mentales de experimentación y conclusiones enunciadas por los docentes. El modelo se construye en el marco metodológico de la teoría fundamentada empleando reportes verbales generados por entrevistas think aloud.

Para llegar a construir el modelo se realizó la investigación en dos fases: inicial y final. La inicial consistió en dos etapas: primero se trabajó en taller y luego con entrevista think aloud. La final se implementó de nuevo entrevista think aloud complementando con entrevista retrospectiva.

ABSTRACT

Physics teachers, when performing thought experiments, emit conclusions not inferred from mental processes and formal scientific knowledge manifests itself as detached from perceptual knowledge. Here we develop a model of cognitive actions to conjectured knowledge mobility in the context of free fall thought experiments, which could explain the lack of a link between mental processes of experimentation and conclusions enunciated by teachers. The model is constructed in the methodological framework of the grounded theory through verbal reports and think-aloud interviews.

In order to build the model, the investigation was carried out in two phases: initial and final. The initial consisted of two stages: first one a workshop was carried out and then think-aloud interviews. The final phase was worked out think-aloud interview complementing with a retrospective interview.

INTRODUCCIÓN

Las características de los experimentos pensados (EP) han permitido que éste instrumento para movilizar conocimientos físicos se traslade al ámbito educativo para contribuir al desarrollo de aprendizajes de leyes y principios físicos.

Trabajos efectuados con profesores reportan confusiones de los profesores para inferir conclusiones de los EP; además, las conclusiones verbalizadas por los profesores no se derivan del proceso mental de experimentación. En dichos trabajos se sugiere que el problema podría explicarse aceptando que el conocimiento de los profesores no está integrado de manera 'adecuada'.

Cabe añadir complejidad a la sugerencia y pensar más allá de la falta de integración entre los contenidos de conocimientos, pues también ocurre que la física intuitiva algunas veces se constituye por sistemas relativamente coherentes de explicación (Pozo 1996/2011; Vosniadou, 2014). Lo cual nos lleva de regreso al viejo problema alrededor de los experimentos pensados: cómo operaciones mentales nos dotan con nuevos conocimientos y conclusiones sobre el mundo material.

Desde el enfoque de los modelos mentales, el EP es un instrumento mediante el cual se movilizan conocimientos, esto es, se explicitan y verbalizan conocimientos tácitos y no verbalizados. En este sentido, quiere decir que 'algo' durante las operaciones de construcción y simulación del modelo mental en el contexto de la experimentación pensada está ocurriendo. Ese 'algo' puede referirse tanto a la falta docente de habilidades para hacer explícitos y verbalizar saberes tácitos, o hasta una manera distinta de operar la construcción y simulación de un modelo mental en el contexto de la experimentación pensada propia de

la formación del profesorado. O, siguiendo las previas sugerencias, simplemente 'algo' es la carencia de integración de los contenidos de los conocimientos.

Entonces, se propone estudiar y entender cómo los profesores movilizan sus conocimientos al construir un modelo mental en el contexto de la experimentación pensada. Es decir, estudiar cómo hacen explícitos conocimientos tácitos y no verbalizados durante la construcción del modelo mental al experimentar en el pensamiento determinando: cuáles son los referentes desde los cuales construyen sus modelos mentales; qué criterios tácitos o no emplean para abstraer información desde los referentes y las restricciones que establecen para relacionarlos; cómo verbalizan la simulación del modelo construido; los criterios de evaluación del modelo que se manifiestan; y el cómo verbalizan información tácita para construir los modelos mentales y alcanzar conclusiones durante la experimentación pensada.

Entender cómo los profesores movilizan sus conocimientos podría proporcionar una explicación al por qué manifiestan conclusiones confusas y erróneas al experimentar en el pensamiento y no sólo sugerir explicaciones.

Luego, el trabajo tesis tiene como propósito estudiar cómo los profesores de física de secundaria movilizan sus conocimientos para construir modelos mentales durante la experimentación pensada.

Los primeros dos capítulos plantean lo expuesto asta aquí; en el Capítulo 2 se presentan las preguntas y objetivos de investigación. El capítulo 3 enmarca teóricamente el trabajo dentro del enfoque naturalista de los EP y con ello tener más claridad de los términos empleados a lo largo del trabajo.

A partir del Capítulo 4 se muestra el trabajo empírico realizado por fases. El Capítulo 4 sintetiza la fase inicial de investigación y las implicaciones metodológicas que llevaron a diseñar la fase final del estudio. Las mejoras metodológicas se presentan en el capítulo 5 y los resultados y discusión en el Capítulo 6. Los ejercicios de análisis no se desarrollan en el texto principal de los Capítulos 4 y 6, en estos sólo se ilustran fragmentos del análisis. Los Anexos 2 y 3 despliegan ejercicios de análisis completos, los cuales ayudan a seguir el hilo de argumentación en los capítulos 4 y 6.

Capítulo 1 Experimentos pensados en física

Resumen del capítulo

El propósito del capítulo es definir los experimentos pensados desde el enfoque cognitivo y mostrar hallazgos globales sobre el empleo de experimentos pensados en el ámbito educativo. A la vez, se reconoce un límite explicativo, tanto desde el enfoque cognitivo como de la didáctica de la física, al aclarar cómo validar y justificar los resultados de un experimento pensado.

Los experimentos pensados se asumen como un caso de construcción y simulación de un modelo mental que permite movilizar conocimientos. La movilidad de conocimientos son acciones mentales para verbalizar, explicitar y hacer uso de conocimientos tácitos al experimentar en el pensamiento.

En la literatura se reporta el empleo de intuiciones físicas y saberes científicos al experimentar mentalmente. Los reportes indican que los expertos, en contraste con novatos, son más hábiles para hacer explícitos y verbalizar información y representaciones empleadas al experimentar en el pensamiento.

Tanto en el enfoque cognitivo como en la didáctica de la física se recurre a la intuición como mecanismo de validación y justificación de los resultados del experimento pensado. Esta explicación resulta limitada por redundante.

1.1 Una definición de experimento pensado

Los experimentos pensados en física son representaciones internas, mentales, de situaciones o fenómenos para experimentar con ellos, manipular y controlar variables para poner a prueba hipótesis,

defender una tesis y hacer preguntas al mundo físico, igual que un experimento ordinario. James Robert Brown (2011) se refiere al *laboratorio de la mente* como el lugar o escenario donde se llevan a cabo los experimentos pensados en analogía al laboratorio para llevar a cabo experimentos físicos ordinarios.

Al realizarse en el *laboratorio de la mente* los experimentos pensados son representaciones idealizadas que se construyen en un escenario inmaterial. Sin embargo, no se quedan en el plano imaginario, se verbalizan y presentan en algún formato de representación externa. Las representaciones externas que emergen en este contexto se ponen a discusión para estudiar los alcances de las ideas científicas y adentrarnos en nuestras propias estructuras cognitivas (Gendler, 2010).

En la didáctica de la física, a partir de *On knowledge and error* de Ernst Mach (1976), se recurre a la experimentación en el pensamiento como método didáctico mediante el cual profesor y alumno conocen lo que se sabe sobre un fenómeno físico. A través de este método los estudiantes hacen explícitas y verbalizan ideas previas ya que, resaltó Mach, la experiencia individual y la memoria son las principales fuentes de referencia al experimentar en el *laboratorio de la mente*.

El experimento pensado como método didáctico contribuye a desarrollar habilidades de indagación (Mach, 1976), fortalecer la imaginación, el razonamiento y el juicio (Matthews, 1988). El experimentador se basa en combinar en el pensamiento condiciones de hechos que conoce; se apega a experiencias físicas conocidas, tal que las ideas inferidas no pueden ser muy diferentes de sus percepciones iniciales. Concebir los experimentos pensados en el ámbito didáctico va más allá de educar las ideas y el pensamiento físico. Es parte de

procesos de aprendizaje al discutir ideas, postular y probar hipótesis, recolectar y analizar datos, escribir reportes y presentar resultados. Los experimentos pensados tienen como propósito adentrar a los estudiantes en los contenidos y procesos de las ciencias a partir de casos ejemplares en la historia del pensamiento científico (Lattery, 2001).

La tradición de la experimentación pensada en física es vasta. Se remonta a los griegos, pasando por la cultura árabe medieval, el auge de la física moderna con Galileo Galilei y contemporáneos, hasta la física relativista y cuántica. En cada revolución científica los experimentos pensados han jugado un rol importante al explorar nuevas formas de pensar (Brown, 1986). Estas nuevas formas de pensar dan lugar a experimentos pensados (EP) constructivos y destructivos.

Siguiendo a James R. Brown (1986), los EP destructivos son aquellos que, con base en imágenes mentales llevadas al límite o reducidas al absurdo, argumentan directamente en contra de una teoría. Los EP constructivos Brown los define como los que dan lugar a nuevas teorías y pueden ser conjeturales (postulan la existencia de fenómenos) o concluyentes (argumentan a favor de un fenómeno).

Al experimentar en el pensamiento se hace uso de suposiciones auxiliares, tanto con EP constructivos como destructivos. Las suposiciones por lo regular son tácitas, implícitas y no verbalizadas. Esto abre la posibilidad a emitir conclusiones, juicios y conjeturas erróneas o falibles al experimentar en el pensamiento. Lo anterior define el problema de cómo justificar y validar los resultados de un experimento pensado, ya sean juicios, conclusiones o conjeturas.

Brown (1986; 2011) plantea la solución al problema de la justificación resaltando que los experimentos pensados dan lugar a una

teorización *a priori*. Aunque los resultados de un EP no proporcionan información empírica nueva o una manera novedosa de leer las teorías científicas, permiten ver dónde hay problemas con los marcos conceptuales de las teorías científicas. Con *a priori* afirma referirse a la independencia de la experiencia sensorial, una forma metafísica de entender los resultados del EP que contribuyen a transitar de una teoría a otra carente de o con escasa evidencia empírica.

La respuesta de Brown es poco convincente por pretender independencia de las experiencias sensoriales. Para Brown (1986), experimentar en el laboratorio de la mente es buscar regularidades universales a través de procesos inductivos. Sin embargo ¿cómo un proceso inductivo para obtener conocimiento sobre el mundo físico puede ser confiable si a la vez sus resultados son independientes de las experiencias sensoriales?, ¿cómo puede confiarse en las inferencias de un EP que trata develar características y propiedades del mundo físico, si a la vez esas inferencias se conciben como independientes de las experiencias sensoriales?

La didáctica de la física ha mostrado la importancia de la memoria y la experiencia sensorial en el proceso de experimentación pensada. Existe consenso en aceptar una base de conocimientos previos sobre los cuales se construyen los escenarios y condiciones mentales de experimentación. Se acepta la imaginación como laboratorio mental donde convergen saberes previos para realizar la experimentación pensada; es en la imaginación donde se visualizan ‘mundos distintos’ (Reiner & Gilbert, 2000). Hay acuerdo implícito en que las representaciones de fenómenos físicos se simulan dinámicamente para generar significados y manifestar diversas ideas en torno a un fenómeno físico (Velentzas & Halkia, 2011; Aisikainen & Hirvonen, 2014).

Nenad Mišćević (1992), Nancy J. Nersessian (1992) y Tamar Szabó Gendler (2010) desde un enfoque cognitivo proponen una solución *a posteriori* al problema de cómo justificar y validar los resultados de un EP. Asumen, similar a los hallazgos en didáctica de la física, que la experiencia sensorial no puede separarse de la experimentación en el pensamiento. En el enfoque *a posteriori* o cognitivo se concibe el experimento pensado como un modelo mental. Los modelos son formas dinámicas de organizar y transformar información, por lo que poseen una estructura funcional y análoga al fenómeno físico de estudio (Nersessian, 2010). La información que subyace en la construcción y simulación de estos modelos es experiencial, por lo que también las conclusiones o conjeturas a las que se llegan son derivadas de la experiencia (Mišćević, 1992).

El enfoque cognitivo sostiene, con diversos matices, que experimentar en el *laboratorio de la mente* es trabajar con información cuasi sensorial. En lugar de inferir conclusiones o conjeturas sobre características y propiedades del mundo físico, se movilizan conocimientos y habilidades cognitivas para obtener cuasi observaciones que conducen a juicios. La justificación de los juicios desde el saber previo deriva en conjeturas o conclusiones.

En este trabajo se asume el experimento pensado como la construcción y simulación de un modelo mental que permite movilizar conocimientos. Movilizar conocimientos en el contexto de la experimentación pensada son acciones para verbalizar, explicitar y hacer uso de ideas tácitas al experimentar en el pensamiento. Una discusión más detallada del término movilidad de conocimientos está desarrollada en el apartado teórico del presente trabajo.

1.2 Experimentos pensados de física en el ámbito educativo

Los experimentos pensados por ser parte del quehacer de la actividad científica son también una forma de pensar que ha de trabajarse en la enseñanza de la física. Tal idea se puede rastrear desde los escritos de Ernst Mach (1905/1976), quien apunta la importancia de los EP para el desarrollo cognitivo. En los escritos de Mach ya encontramos elementos propios del constructivismo escolar de la enseñanza de las ciencias (Matthews, 1998), destacando la contribución de los experimentos pensados a una educación que fortalece el razonamiento, la imaginación y el juicio.

Los experimentos pensados (EP) en la enseñanza de la física, siguiendo a Mach, ayudan a los aprendices a dar sentido a lo que se aprende, se contextualiza el conocimiento con elementos imaginativos, y se accede críticamente al desarrollo histórico de la física. No implica que la enseñanza de la física se limite al experimento en el pensamiento, por el contrario, este es antesala del experimento ordinario; Mach pensaba que todo experimento ordinario en la investigación propia de la física se efectúa primero en el pensamiento y la imaginación, dígase que el EP es la construcción de la hipótesis. Luego, el EP fue considerado por Mach como una herramienta pedagógica utilizada por el profesor para conocer las ideas de sus alumnos en torno a los fenómenos físicos que se estudian.

Mach también sostenía que los EP ayudan a construir en la imaginación circunstancias físicas que no se pueden encontrar en la realidad para poner a prueba la consistencia interna de las teorías. Tal característica llevada al aprendizaje de la física implica manipular

variables que simulen un fenómeno físico con base en el conocimiento del experimentador, con la pretensión de que el experimentador, el aprendiz, evalúe la simulación construida desde su base de conocimientos para determinar posibles inconsistencias en la misma.

Mach señala el método básico del EP: iniciar por construir en la imaginación una representación de las circunstancias físicas por estudiar; variar tanto las circunstancias como el rango de validez de las ideas relacionadas a dichas circunstancias, es decir, las ideas se modifican y particularizan conforme varía el procedimiento de circunstancias imaginadas. Finalmente, si los resultados de un EP no se asocian con las circunstancias esperadas teóricamente, se busca la inconsistencia o se construye una conjetura; para Mach la conjetura es un espacio de espera entre el experimento pensado y el experimento físico u ordinario y por ello no resulta científica.

Mach le atribuyó a los EP bastos atributos pedagógicos, desde instrumentos para conocer ideas previas de los estudiantes hasta promotores del cambio conceptual. No obstante, los escritos de Mach fueron producto de la reflexión crítica, filosófica e histórica que hace de la física. En sentido pedagógico los escritos de Mach sobre los EP carecen de valor empírico y de un análisis propiamente didáctico. Él buscó contar una historia crítica de la física y reconocer la experimentación mental y la imaginación como entes esenciales del trabajo de los físicos; argumentó contra la satanización de dichas entidades que se ejercía desde el positivismo de las ciencias.

Es hasta finales del siglo XX y principios del XXI cuando se comienzan a considerar los EP en la enseñanza de la física como objeto de investigación y análisis educativo. Al inicio las propuestas emplearon

y estudiaron el rol de los EP en la enseñanza y aprendizaje de la física con diversos enfoques: desarrollar la imaginación científica; acercar los estudiantes a la cultura científica; desarrollar habilidades para construir hipótesis y diseñar experimentos físicos ordinarios (ver por ejemplo, Helm, et. al., 1985; Stinner, 1990; Klassen, 2006).

La lectura de los antecedentes nos permite ubicar diferentes momentos en los cuales los experimentos pensados se ejecutan durante la enseñanza y aprendizaje de la física a la par de otras actividades. Por ejemplo, Arthur Stinner (1990) considera el aprendizaje de la física un espectro donde se identifican dos momentos: pre algorítmico y post algorítmico. Los EP son aparatos mentales de tipo discursivo en la etapa pre algorítmica para explicar conceptos, paradojas y principios. De manera idealizada, cuando los estudiantes han educado su imaginación científica y llegan al extremo post algorítmico al recorrer todo el espectro de aprendizaje de la física, deberían ser capaces de generar sus propios EP.

En otras posturas el EP se emplea al inicio de los procesos de enseñanza y aprendizaje para recuperar el conocimiento previo o hacer explícito el saber tácito (Reiner, 2000). También la experimentación en el pensamiento se puede ubicar al momento de abrir brecha entre saberes empíricos y las teorías científicas (Helm, 1985; Velentzas et al., 2011), o para finalizar procesos de aprendizaje cuando los estudiantes emiten conclusiones y ponen en juego las habilidades que debieron adquirir (Lattery, 2001; Velentzas, 2011). Además, los EP se sitúan en un estadio previo o vinculado a la experimentación empírica ordinaria de la enseñanza de la física, con la finalidad de generar hipótesis o diseñar experimentos (Lattery, 2001; Reiner, 2004; Velentzas, 2010).

El momento en el que se ubica el empleo de los EP durante los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física se vincula al rol o función pedagógica que se les asigne. Los roles identificados son metodológico o teórico. El rol teórico busca emplear los EP para comprender, explicar y comunicar teorías, conceptos abstractos, contraintuitivos, principios y paradojas propias del pensamiento de la física (Stinner, 1990; Velentzas, 2011a; Velentzas, 2011b; Velentzas & Skordoulis, 2011; Velentzas, 2013; Asikainen, 2014). El rol metodológico implica emplear los EP para solucionar problemas cualitativos, y como apoyo en pequeños proyectos de investigación escolares que pretenden acercar los estudiantes a la cultura científica (Clement, 1994; Gilbert & Reiner, 2000; Lattery, 2001; Clement, 2003; Reiner, 2004; Velentzas, 2010).

Diversos trabajos reportan los conocimientos movilizados al experimentar en el pensamiento, y se pueden agrupar: (1) estudios con novatos, es decir, con estudiantes de educación básica, media y profesores en formación; (2) estudios con expertos, a saber, físicos integrados o en proceso de integrarse a la comunidad científica; (3) y con profesores de física en servicio (trabajos que se revisan con más detalle en el capítulo 2).

- Novatos. Los conocimientos que movilizan durante la experimentación pensada son experiencias previas y sentido común. Los novatos emplean los EP para dar solución a problemas de tipo cualitativo. Durante el proceso de experimentación pensada se ayudan de sus conocimientos para modificar los escenarios y objetos imaginados, transformándolos en situaciones análogas con las que están familiarizados, y así, facilitar la solución de los problemas (Helm, 1985; Stinner, 1990;

Reiner & Gilbert, 2000; Reiner & Gilbert, 2004; Klassen, 2006; Velentzas & Halkia, 2010; Velentzas & Skordoulis, 2011; Velentzas & Halkia, 2011; Blown & Bryce, 2013; Velentzas & Halkia, 2013; Kösem & Özdemir, 2014; Acar & Gürel, 2015).

- Expertos. Movilizan en mayor medida conocimientos teóricos, principios y leyes físicas, haciendo del EP un mecanismo para explicar las soluciones que obtienen al resolver problemas cualitativos, cuantitativos, investigaciones y para explorar los límites teóricos de las teorías científicas. Durante el proceso de experimentación pensada manipulan las variables imaginadas, alternan entre variables dependientes e independientes; modifican las entidades conceptuales y físicas presentes en el escenario imaginado, permitiéndose efectuar explicaciones precisas (Clement, 1994; Reiner & Gilbert, 2000; Clement, 2003; Acar & Gürel, 2014; Asikainen & Hirvonen, 2014; Kösem & Özdemir, 2014).
- Profesores. Movilizan conocimientos de sentido común, experiencias, saberes de principios y leyes físicas. Utilizan los EP para hacer una hipótesis con la respuesta a la que han llegado al solucionar un problema, pues requieren asegurarse de tener una solución correcta. Al movilizar conocimientos modifican las características del sistema físico imaginado para explorar y encontrar maneras de justificar sus respuestas a los problemas. Los profesores manifiestan que el experimento pensado no es un instrumento científico y cognitivo válido para obtener una respuesta a un problema porque el EP recurre al sentido común y saberes experienciales (Reiner & Gilbert, 2000; Özdemir, 2009; Asikainen & Hirvonen, 2014).

En la literatura se aprecia la importancia de la memoria en el proceso de experimentación pensada; existe el consenso de una base de conocimientos previos (experiencias físicas, sentido común, conocimiento científico) sobre los cuales se construyen los escenarios y condiciones mentales de experimentación. Se aprecia la imaginación como espacio mental donde convergen saberes previos y ocurre la experimentación pensada, es el *laboratorio* donde se visualizan ‘mundos distintos’ (Reiner & Gilbert, 2000), donde las representaciones de fenómenos físicos se simulan dinámicamente para generar significados. Además, en los anteceden se reconoce la presencia de procesos lógicos -en diferentes niveles de abstracción entre novatos, profesores y expertos- mediante los cuales se obtienen conclusiones, de manera que se manifiesten diversas ideas en torno a un fenómeno (Velentzas & Halkia, 2011; Aisikainen & Hirvonen, 2014).

Sin importar se trate de expertos, novatos o profesores de física, en todos los reportes aparecen de manera explícita o implícita un ‘método general’ de experimentación pensada. El método prevaleciente es, a grandes rasgos, el descrito por Mach (1976) antes explicado. Primero, de la memoria recuperan conocimientos para representar en la imaginación los fenómenos físicos de estudio; principalmente conocimientos provenientes de experiencias sensoriales e intuiciones físicas que se asocian con conocimientos científicos. En segundo lugar, el experimentador procede a operar sobre y con el fenómeno físico al construir un modelo mental que representa el fenómeno; para esto, es necesario abstraer elementos de la presentación narrativa del EP. En tercer lugar, el experimentador establece secuencias y relaciones entre los diversos elementos de su modelo mental, y explora posibles

consecuencias producto de las relaciones establecidas. Finalmente, el experimentador decreta una conclusión o resultado.

Una diferencia sustancial entre novatos, expertos y profesores radica en el uso otorgado al experimento pensado: buscar solución a un problema (novatos), explicar la solución encontrada (expertos) y probar la solución (profesores). Para John Clement (2008; 1988), quien sostiene que toda simulación en la mente de fenómenos físicos se construye con esquemas perceptuales, la diferencia entre expertos y novatos reside en el empleo de conocimientos: uso inconsciente del conocimiento (propio de novatos, aunque no exclusivo); uso consciente pero no verbalizado; y el empleo verbalizado y descriptivo del conocimiento (inherente a expertos).

Las cualidades anteriores de los EP en la didáctica de la física permiten vincular su faceta educativa con el gran problema epistemológico de cómo justificar los resultados de experimentar en el *laboratorio de la mente*. En concreto:

- Desde el rol teórico los EP son un caso de construcción y simulación de modelos mentales explicativos y contrastables con modelos teóricos ideales -en el apartado teórico de este trabajo se presentan las diferencias entre unos modelos y otros-; la finalidad es apropiarse las construcciones discursivas de la ciencia para explicar fenómenos físicos.
- Desde el rol metodológico, son experimentos *sui generis* para solucionar problemas en el límite de los conocimientos del experimentador; en la física, como disciplina científica, los experimentos pensados ponen a prueba la coherencia y

consistencia interna de los conceptos y principios en el límite de las teorías científicas.

1.3 Experimentos pensados entre la didáctica y la epistemología de la física

El problema alrededor de los experimentos pensados consiste en responder ¿cómo es posible que principios descubiertos por reflexión, introspección o procedimientos imaginarios puedan guiar la experiencia humana y tener validez en relación con los objetos externos de la experiencia?

De acuerdo con la postura cognitiva la respuesta se consigue al considerar los experimentos pensados como un modelo mental dinámico desencadenado por su presentación narrativa (Stuart, Fehige & Brown, 2018); el éxito epistémico del EP es resultado de la movilidad de habilidades cognitivas al manipular el modelo mental (Nerssesian, 1992; 2008; 2018). Al experimentar en el pensamiento se movilizan conocimientos cuasi sensoriales, saberes que de otra manera no se evocan (Szabó, 2004; 2007; 2010). Por conocimientos cuasi sensoriales se entiende la extensión de conocimientos perceptuales a sistemas de representación para operar en escenarios imaginarios.

Los conocimientos cuasi sensoriales hacen vívidos los escenarios imaginarios que representan fenómenos físicos. Estas representaciones vívidas proporcionan imágenes mentales y cuasi observaciones de propiedades contingentes y falibles del mundo natural (Misčević, 1992; 20001; 2007; Szabó 2004; 2007; 2010). Siguiendo a Tamar Szabó Gendler (2004; 2010), las imágenes conllevan un compromiso activo del experimentador; o sea, un compromiso a discutir significados de palabras

y por comprender el mundo. Pensar sobre cómo se comporta el fenómeno físico por medio de cuasi observaciones, lleva al experimentador a conjeturar proto teorías físicas o representaciones cuasi perceptuales (Misčević, 2000; 2001; 2007; Szabó 2004; 2007; 2010) que habrán de demostrarse o validarse.

En el enfoque cognitivo el mecanismo para validar juicios emergentes al experimentar en el pensamiento es la intuición (Misčević, 2001; 2007; Szabó 2004; 2007; 2010). La intuición valida el resultado del experimento pensado porque es un conjunto integrado por conocimiento tácito específico y el proceso cognitivo que exterioriza dicho conocimiento a un estado consciente, el cual se acepta como estado de verdad real, verdad aparentemente real y verdad necesaria (Misčević, 2000). La explicación cognitiva implica que la intuición explicita estados de verdad autoevidentes, justificados en sí mismos (Gráfico 1.1).

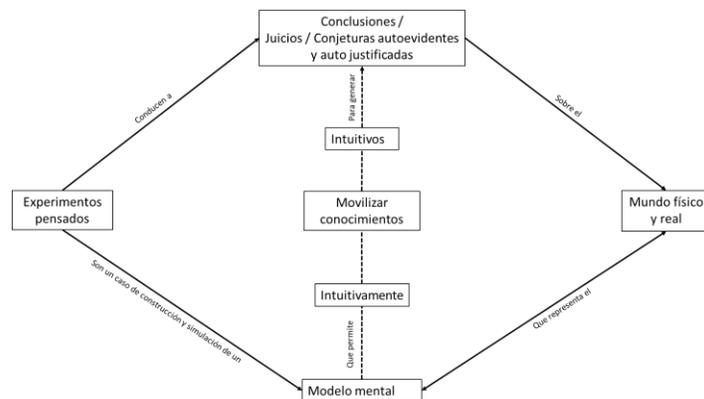


Gráfico 1.1 Experimentos pensados en el enfoque cognitivo (Elaboración propia)

El experimento pensado es un caso de construcción y simulación de modelo mental que permite intuitivamente movilizar conocimientos intuitivos, es decir, verbalizar y hacer explícitos conocimientos tácitos no verbalizados; movilizar conocimientos permite generar conclusiones,

conjeturas o juicios sobre el mundo físico que se justifican y validan por ser autoevidentes al aceptarse como estados de verdad real, verdad aparentemente real y verdad necesaria.

Aunque en el presente trabajo se adopta la postura cognitiva para explicar la naturaleza epistemológica de los experimentos pensados, se reconoce el problema de la controversia y polisemia alrededor de la *intuición*; y aún más porque la intuición está ligada a otro proceso cognitivo controversial, la imaginación.

La imaginación es el proceso cognitivo que desencadena la intuición, de allí que a los EP también se les conozca como *bombas de intuición* (Dennet, 2013). Imaginación e intuición poseen poco consenso alrededor de su naturaleza cual procesos cognitivos. Sin embargo, aunque con diferentes matices, la postura cognitiva ha hecho esfuerzos por comprenderlos. La imaginación es el proceso cognitivo que nos permite operar sistemas representacionales que son extensión del conocimiento perceptual y sensorial.

La intuición a su vez es un proceso cognitivo que “ofrece una representación compacta y global de un grupo de datos, ayuda a superar la insuficiencia de la información, introduce interpretaciones significativas para el comportamiento en un proceso de razonamiento” (Fischbeim, 2002:12). La intuición además de ser proceso cognitivo es un particular tipo de conocimiento en grupos de información compactada (*chunks*); este conocimiento nos ofrece una “respuesta que produce una creencia fenomenológicamente inmediata, acompañada de un sentimiento de obviedad y certidumbre” (Misčević, 2000:88).

Independientemente de aceptar la intuición como proceso cognitivo o conocimiento, la intuición proyecta una sensación de unidad

entre ser proceso cognitivo y conocimiento, dado su carácter fenomenológico y concreto. Esto significa, los procesos de razonamiento despliegan intuiciones específicas conforme el problema o escenario imaginario concebido. Por ejemplo, un EP de mecánica despliega intuiciones físicas.

La presente tesis no resolverá los problemas sobre la naturaleza ontológica y epistemológica de la intuición e imaginación. Solo se reconocen los límites explicativos del enfoque cognitivo del experimento pensado, pues la intuición como mecanismo para validar los resultados de un experimento pensado es una explicación redundante, ya que se adopta la intuición para validar la intuición misma.

Igual limitación explicativa se observa en didáctica de la física; la intuición y la imaginación también cobran relevancia para dar cuenta de los procesos para poner en acción conocimientos y justificar y validar las conclusiones emitidas al experimentar en el *laboratorio de la mente*.

Antes se mencionaron los roles teórico y metodológico de los EP para conectar las discusiones didácticas con discusiones de naturaleza epistemológica. Ya sea emplear el experimento pensado para apropiarse los principios y leyes físicos contraintuitivos o valerse de él para solucionar problemas, se ha probado el empleo de conocimientos previos (perceptuales o experiencias físicas; sentido común; conocimiento físico) para crear escenarios imaginarios, *mundos posibles*, donde se construye y simula un modelo mental. La imaginación, estimulada por la narrativa o la historia alrededor de los EP, detona intuiciones y compromete a los experimentadores afectiva y cognitivamente (Hadzigeorgiou, 2016; Klassen, 2006) a explorar soluciones al problema o comprender principios físicos contraintuitivos. Clement (2008; 1988) por su parte

mostró diferentes usos del conocimiento durante la experimentación pensada: inconsciente, consciente pero no verbalizado y verbalizado-descriptivo.

La validez o justificación del resultado teórico o metodológico del experimento pensado reside, al igual que en la postura cognitiva, en la intuición como proceso y conocimiento autoevidente que no requiere de una justificación adicional (Reiner & Gilbert, 2000; 2004; Clement, 2008), aunque es preciso aclarar que son pocos los trabajos que discuten el problema de justificar y validar los resultados del EP. Al respecto, Clement (1988; 1994; 2003; 2008) ha trabajado en desarrollar un modelo de intuición física sin distinguir entre novatos y expertos (ver el siguiente capítulo), al punto que su trabajo es referencia en las discusiones desde el enfoque cognitivo (Szabó, 2004; 2007; 2010; Nersessian, 2010).

Capítulo 2. Planteamiento del problema. Los profesores de física y sus experiencias con los experimentos pensados

Resumen del capítulo

El propósito del capítulo es presentar la pregunta y propósitos de la investigación del trabajo de tesis. Se enmarca el trabajo en un problema general y amplio discutido en la literatura: cómo justificar y validar la conclusión de un EP.

Investigaciones sobre experimentación pensada con profesores de física documentan que las conclusiones obtenidas por los docentes no se infieren de sus procesos mentales de experimentación. Al justificar y validar los resultados del experimento pensado se observan desligados los conocimientos científico formal y perceptual. Sin embargo, no se explica por qué las conclusiones no se infieren de los contenidos empleados al experimentar en el pensamiento, ni por qué la separación entre conocimiento científico y perceptual.

El capítulo discute un par de esfuerzos por explicar el proceso de razonamiento para validar los resultados de un experimento pensado: el enfoque de representaciones imaginarias e intuición física y el enfoque cognición enraizada en el cuerpo.

Las investigaciones revisadas no ayudan a profundizar y describir las acciones mediante las cuales los docentes movilizan conocimientos. Es decir, se carece de un esquema o modelo de acciones que permitan comprender cómo los profesores de física verbalizan y hacen explícitos conocimientos; un esquema que

precise cómo los docentes manifiestan sus conocimientos en *acción*.

El presente trabajo de tesis se propone estudiar las acciones mentales que llevan a cabo los docentes cuando movilizan conocimientos al experimentar en el pensamiento. Un modelo de acciones al movilizar conocimientos puede arrojar evidencia sobre procesos de razonamiento docente efectivos al experimentar en el pensamiento, lo cual implica explicar la falta de vínculo entre procesos mentales de experimentación y conclusiones.

2.1 Los profesores de física como experimentadores mentales

Los experimentos pensados (EP) devienen problemáticos como objeto de estudio al preguntar cómo justificar y validar resultados no empíricos que emergen de instrumentos mentales cuyo propósito es explicar el mundo físico. En parte el problema se debe a la susceptibilidad al error; los EP nunca dejan de ser falibles, y pocas veces advierten al experimentador sobre un desacierto, de allí la necesidad de justificar y validar la conclusión emitida.

La formación inicial del docente de física en secundaria carece de espacio curricular para estudiar los EP como instrumentos de pensamiento. Los educadores, quizá sin saberlo, ejecutan EP y estudian ejemplos empleados en libros de textos, pero sin reflexión intencional sobre la naturaleza de la experimentación pensada. La pobre comprensión de los profesores sobre esta particular manera de experimentar da cabida a la desconfianza hacia los EP. Esta desconfianza está ligada a la susceptibilidad al error inherente al EP; para

los profesores los EP, al involucrar conocimiento perceptual, conducen a conclusiones erróneas o no válidas (Ozdemir, 2009).

Omer Faruk Ozdemir (2009) reporta lo hecho por docentes al resolver problemas cualitativos sobre situaciones físicas; los participantes evitaron emplear EP para solucionar los problemas o explicar y justificar sus soluciones; Ozdemir reconoció el conocimiento perceptual como la causa de eludir la experimentación pensada. El investigador sugiere poca integración entre conocimiento formal (conocimiento de modelos teóricos, leyes y principios físicos) y perceptual como razón subyacente al evitar y errar al concluir la experimentación pensada. No reflexionar el conocimiento perceptual a la luz del conocimiento formal deja a los maestros sin experiencia y habilidades para justificar y validar conclusiones al experimentar en el pensamiento.

La falta de integración entre conocimiento formal y perceptual, aunada la falta de comprensión de contenidos y de la física teórica en general, también es sugerida como obstáculo para ejecutar EP por Mervi A. Aisikainen y Pekka E. Hirvonen (2014). Las investigadoras exponen su trabajo con profesores en servicio y en formación. Aisikainen e Hirvonen señalan la falta de habilidad por parte de los docentes para obtener consecuencias correctas de los EP y carencia de conocimientos previos para identificar la relevancia de un EP. Lo anterior implica facultad de los docentes para describir el escenario imaginario y un modelo mental que represente el sistema físico en cuestión, pero errar al ejecutar el EP y no validar la conclusión. Quienes logran conclusiones correctas no las infieren necesariamente de los resultados de experimentar en el pensamiento y sí de recuperar información precisa de la memoria, con el riesgo de imbricar contenidos de manera confusa.

Si bien estos hallazgos están en sintonía con otros trabajos al identificar movilidad de conocimientos formales y perceptuales, también sugieren, producto del conocimiento fragmentado, falta de habilidad de los docentes para validar y justificar los resultados del EP. Se podrían aceptar tales sugerencias como principales responsables de evitar, errar y no justificar la conclusión del EP. No obstante, se invita a reflexionar en torno a la importancia de las acciones mentales de los docentes para explicitar diferentes tipos de conocimiento; las acciones al modelar un fenómeno físico y al conectar e interpretar el conocimiento perceptual con base en el conocimiento formal, ¿son los conocimientos parciales y poco integrados los que conducen a los docentes a evadir o fallar al experimentar en el pensamiento, o sus acciones para explicitar y verbalizar los conocimientos implicados son poco efectivas?

Se trata de problematizar la relación concepto-acción en el contexto de la experimentación pensada: ¿de qué manera la acción determina el dominio conceptual del contenido, y de qué manera el dominio conceptual del contenido determina la acción al experimentar en el pensamiento?

Aunque el problema no se ha abordado en los términos anteriores, se estudió la propensión al error al experimentar en el pensamiento. Miriam Reiner y Lior M. Burko (2003) caracterizaron los errores cometidos al experimentar en el pensamiento. Elaboran una tipología de tres mecanismos cognitivos que conducen al error: intuición, incompletitud e irrelevancia. Las tres 'I' o I³ (Reiner & Burko, 2003) las proponen para predecir los tipos de errores que se cometen con EP escolares.

La intuición refiere suposiciones auxiliares que se basan en experiencias físicas anteriores; prejuicios incorrectos conducen a conclusiones falsas. La incompletitud es dejar fuera suposiciones auxiliares que ayudan a imaginar un escenario para la experimentación pensada; dejar fuera suposiciones relevantes del fenómeno estudiado implica llegar a juicios equívocos. La irrelevancia es hacer uso de suposiciones auxiliares no necesarias al construir un escenario imaginario, tal que conducen a conclusiones no relevantes para comprender fenómenos físicos naturales.

La tipología I³ ayuda a interpretar las acciones de los docentes como mecanismos cognitivos que les conducen a evitar los EP, emitir conclusiones erróneas o concluir reproduciendo información precisa y memorizada. Pero una vez más está implícito el supuesto del contenido como factor determinante de la acción mental. La intuición se basa en operar contenido de suposiciones perceptuales y experiencias previas; este tipo de suposiciones exacerbaban la sensación de susceptibilidad al error, por lo que los docentes evitan el EP. El conocimiento parcial o poca comprensión del contenido relacionado con la situación imaginada subyace la acción de valerse de un escenario imaginario incompleto o emplear supuestos irrelevantes. La incompletitud e irrelevancia indican escasa integración entre conocimiento formal y perceptual. Las limitantes de contenido explican por qué los docentes fallan al experimentar en el pensamiento y al validar sus conclusiones.

No se niega la falta de comprensión de los contenidos y poca integración del conocimiento docente. Trabajos cuyo objeto de estudio es el conocimiento profesional docente arriban a conclusiones semejantes: los profesores de ciencias tienden a dar primacía a los aspectos lógicos y academicistas de las ciencias frente a los aspectos psicológicos (Porlán

Ariza, Rivero García, y Martín del Pozo, 1998). Esto sugiere pobre comprensión de los contenidos, reproducción mecanicista del conocimiento, y ausencia de reflexión en torno a los contenidos disciplinares.

El conocimiento científico de los docentes encierra concepciones alternativas similares a las registradas entre los estudiantes (De Jong, 2003); conocimiento que no pueden operar a nivel teórico y práctico. En consenso implícito, se reconoce el conocimiento de contenido como conjunto descriptivo de contenidos memorizados de manera inerte y aislada (McDermott, Shaffer & Constantinou, 2000). En consecuencia, se observa entre profesores carencia de habilidades para establecer relaciones entre conceptos; justificar el origen de los conceptos y sus relaciones con la realidad representada; valorar y evaluar las limitaciones entre relaciones conceptuales y con los fenómenos físicos representados (McDermott, Shaffer & Constantinou, 2000; Matthews, 2015). México no es excepción; los profesores poseen pobres niveles de comprensión de los contenidos científicos y manifiestan problemas para trabajar componentes teóricos y prácticos del contenido disciplinar (Flores Camacho, Gallegos & Barojas, 2000).

Más allá de estos hallazgos sobre conocimiento profesional docente, el presente trabajo parte del supuesto: evadir el experimento pensado, errar al experimentar y no justificar y validar la conclusión, es producto de 'algo' al construir, simular y verbalizar un modelo mental. Desde el enfoque cognitivo aquí adoptado, el EP es un instrumento mediante el cual se movilizan conocimientos, esto es, se explicitan y verbalizan conocimientos tácitos y no verbalizados. Quiere decir que 'algo', durante las operaciones de construcción, simulación y

verbalización del modelo mental en el contexto de la experimentación pensada, está ocurriendo.

‘Algo’, siguiendo la literatura previa, podría ser la exigua integración de conocimientos; pero, pensando en las acciones ejecutadas para emplear conocimientos en contextos de experimentación pensada, ‘algo’ podría referirse a estrategias ineficaces de los docentes para explicitar y verbalizar saberes tácitos, o construir y simular un modelo mental de maneras distintas a las esperadas desde la ontología del EP en física como disciplina científica.

Aunque el problema sobre cómo se verbalizan y explicitan conocimientos en el contexto de la experimentación pensada no se ha abordado en concreto, existen esfuerzos por comprender cómo se validan y justifican las conclusiones de los EP. Entre dichos esfuerzos se mencionarán dos porque abordan *grosso modo*, y de manera indirecta, el problema de la movilidad de conocimientos: enfoque de cognición enraizada en el cuerpo expuesto por Miriam Reiner (2000) y modelo de representaciones imaginarias e intuiciones físicas de John J. Clement (1988; 2003; 2008).

2.2 Cognición enraizada en el cuerpo y experimentos pensados

Reiner (1998; 2000; Reiner & Gilbert, 2000; 2008) se propone abordar el problema de la validez de los experimentos pensados, en concreto, saber cómo el conocimiento enraizado en el cuerpo (*embodied cognition*) está contenido en los EP empleados al resolver problemas en física (Reiner, 2000; Reiner & Gilbert, 2008). Trabajó con doce estudiantes entre edades de 15 y 16 años, adolescentes sin conocimientos previos en

física; les entregó un problema de mecánica para resolver en grupos de tres integrantes.

Con base en las discusiones al interior de los cuatro grupos de participantes, Reiner (2000; Reiner & Gilbert, 2008) concluye: validar o justificar los resultados de un experimento pensado es trivial porque estos encarnan conocimiento corporal. El conocimiento encarnado, al experimentar en el pensamiento, deviene en axiomas sobre los cuales se construye el escenario imaginario donde se efectúa el experimento. La memoria corporal, defiende Reiner, proporciona información encarnada justificada por la experiencia corporal misma, por lo que es autoevidente y no requiere justificación adicional. El conocimiento encarnado y autoevidente es tácito, inconsciente y no verbalizado; al ser sometido a análisis ayuda a predecir el comportamiento de sistemas físicos.

Reiner interpreta los resultados desde suponer: (1) el conocimiento encarnado es reflejo de la manipulación dinámica de objetos (p. ej. montar en bicicleta, levantar y lanzar objetos); (2) el conocimiento encarnado se incorpora para responder a estímulos mediante actos corporales (p. ej. nadar, saltar, correr); (3) este conocimiento es mecanismo de predicción del comportamiento de objetos físicos y actos corporales.

Al experimentar en el pensamiento se integran imágenes visuales, experiencias corporales, conocimiento formal e inferencias lógicas en procesos de pensamiento funcionales (Reiner & Gilbert 2000; 2008). Las experiencias sensoriales y tres tipos de visualización son la base del diseño, ejecución y resultado del EP. Las primeras son la base del conocimiento encarnado, el cual es no consciente, está *oculto* y se pone en acción como conocimiento implícito e intuitivo (Reiner & Gilbert, 2000).

La visualización es el componente central de la experimentación (Reiner, 2000; Reiner & Gilbert, 2000; 2008) porque está presente al visualizar el escenario imaginario donde ocurre el experimento, visualizar el experimento y visualizar los resultados.

Reiner identifica las acciones, a las que llama estrategias, empleadas por los estudiantes para ejecutar EP (Reiner, 1998; 2000; Reiner & Gilbert 2008):

- a) Con base en experiencias corporales, describir el comportamiento mecánico de los cuerpos como si la persona sintiera los efectos mecánicos.
- b) Imaginarse a sí mismo en el lugar de objetos específicos para describir el comportamiento de tales cuerpos.
- c) Describir el comportamiento físico de los objetos empleando descripciones corporales, sin referir al cuerpo.

Las tres acciones descritas, (Reiner, 1998; 2000; Reiner & Gilbert 2008), facilitan a los estudiantes emitir conocimientos intuitivos -de carácter tácito y cualitativo-, ver y comprender procesos físicos. Los conocimientos intuitivos son “una serie de memorias sensoriales y esquemas de imágenes los cuales no están necesariamente verbalizadas” (Reiner & Gilbert, 2008). El conocimiento corporal, almacenado en la memoria como esquemas de imágenes, ayuda a visualizar el experimento y los resultados; al estructurar dichos esquemas con inferencias lógicas y conceptuales, el saber intuitivo deviene conocimiento físico.

Para el enfoque encarnado (Reiner & Gilbert, 2000; 2008) las intuiciones empleadas durante los EP pueden ser improductivas y suscitar errores tipo I³ cuando dichas intuiciones se fundan sobre

experiencias inapropiadas. Significa, las experiencias no estructuradas o estructuradas con base en concepciones erróneas o alternativas producen intuiciones erróneas y no productivas que se emplean como axiomas al experimentar en el pensamiento.

Las tres acciones para ejecutar EP, identificadas por Reiner, hacen innecesario validar o justificar los resultados porque el acto de visualizar los objetos, con referencia en el cuerpo o el cuerpo en lugar de los objetos, en sí mismo hace palpable el resultado; el experimento y su resultado se 'ven' porque previamente se ha vivido la experiencia.

Las tres acciones o estrategias de Reiner implican verbalizar y explicitar visualizaciones del escenario imaginario, el experimento y los resultados. Las imágenes mentales, representaciones icónicas internas, son vistas por el experimentador como si fueran parte del sistema o el sistema mismo; entonces la experiencia visual interna se narra, las imágenes tornan representación verbalizada. Sin embargo, el alcance del trabajo de Reiner está limitado a las acciones en colaboración; en condiciones de colaboración, los EP se desencadenan en discusión y los procesos de pensamiento son producto de negociación (Reiner, 1998; 2000; Reiner & Gilbert, 2008). Es preciso resaltar otro aspecto, el trabajo de Reiner es con estudiantes entre los 15 y 16 años, sin conocimientos previos en física más allá del contacto logrado durante sus años de educación básica.

El enfoque encarnado hace del experimento pensado una inferencia lógica. No obstante, los EP son más complejos que experiencias pasadas sometidas a procesos lógicos, ya sean deductivos o inductivos (Miščević, 1992; 2000; 2007; Nersessian, 2008; Szabó, 2010). Al experimentar en el pensamiento hay procesos cognitivos de

transformación y asociación de información poco comprendidos (Nersessian, 2008). Reiner no logra adentrarse en la acción mental individual; en un ambiente de discusión, colaboración y negociación de pares, sabe que los experimentadores visualizan en la mente un experimento y el resultado; nos enseña que el escenario de experimentación se diseña con base en esquemas de imágenes construidas en conocimiento corporal, esquemas utilizados como axiomas estructurados por procesos lógicos; asimismo, reporta evidencia de tres estrategias empleadas por los experimentadores para ejecutar el EP y comunicar los resultados.

El siguiente punto presenta otra explicación sobre las acciones al hacer explícitos y verbalizar conocimientos cuando se ejecutan EP. Aunque el enfoque es similar al defendido por Reiner, despliega alcances distintos.

2.3 Experimentos pensados, representaciones imaginarias e intuición física

John J. Clement (1988; 2003; 2008), motivado por la importancia de los EP en los descubrimientos científicos, aborda el problema del rol que juegan las imágenes -representaciones imaginarias- e intuiciones físicas en los procesos de pensamiento científico. Su preocupación es doble: (1) encontrar evidencia empírica sobre el uso de imágenes e intuiciones durante simulaciones mentales propias del pensamiento científico; (2) entender cómo se usan las simulaciones de representaciones imaginarias para abordar la *paradoja fundamental de los experimentos pensados*. Tal paradoja es el problema de validar y justificar los resultados de los EP. Asume como punto de partida que las

representaciones imaginarias tienen poder explicativo en determinados procesos de pensamiento.

Clement elabora protocolos que emergen de entrevistas *think aloud* (pensar en voz alta) y al contrastar las acciones de un experto y un novato al resolver problemas de física. Complementa los protocolos con registros de gestos y movimientos de manos expresados por los participantes; para Clement, los gestos y movimientos corporales no solo tienen función comunicativa, denotan procesos de pensamiento superior. La investigación se desarrolla en el contexto de solución de problemas de física que implican, tanto simular en el pensamiento representaciones de fenómenos físicos, como validar las soluciones encontradas; Clement (1988; 2008) concibe los experimentos pensados como método para solucionar problemas.

Cuatro tipos de categorías se abstraen de los protocolos de Clement para saber cuándo una persona diseña y simula una representación imaginaria: proyecciones de acción personal, movimiento de manos, expresar imaginación, y reporte de imaginación dinámica. La primera contiene redescpciones de sistemas físicos en términos de acciones humanas; estas verbalizaciones de los participantes son semejantes a las acciones reportadas por Reiner antes descritas. El movimiento de manos comprende gestos y movimientos que acompañan, ejemplifican, describen y precisan las expresiones orales de los participantes. Expresar imaginación engloba expresiones tipo “imagino”, “siento que”, “es como x situación”. La cuarta categoría involucra descripciones de movimientos y cambios del sistema físico.

Las categorías son, para Clement, evidencia del uso de imágenes e intuiciones al simular representaciones imaginarias en procesos de

pensamiento científico. A partir de tales evidencias, Clement (1988; 2003; 2008) construye un marco explicativo -del uso de representaciones e intuiciones- para discutir el rol de las representaciones imaginarias al hacer inferencias y evaluar soluciones de problemas físicos.

Novatos y expertos emplean esquemas motrices y perceptuales para simular sistemas físicos en la mente. La simulación imaginaria la define conforme tres criterios (Clement, 2003; 2008): activar algún esquema motor o perceptual, el cual posibilita manipular objetos físicos reales; el esquema posee una imagen de un objeto físico específico; el esquema ejecuta acciones como sistema análogo de objetos reales, permitiendo a la persona 'observar' el comportamiento del sistema físico, y emitir predicciones.

Los esquemas motrices y perceptuales subyacen a intuiciones con las que se construyen y simulan representaciones imaginarias de sistemas físicos. Por lo tanto, las intuiciones refieren conocimientos concretos de objetos y situaciones, y no principios y leyes físicas abstractas. Clement advierte no confundir la intuición física con recuerdos incidentales; estos últimos son específicos, mientras la intuición física es estructurada y jerarquizada.

Dentro del marco explicativo desarrollado por Clement, la intuición, al tener como base esquemas motrices y perceptuales, es de carácter interpretativo, no inferencial como con la cognición enraizada en el cuerpo. Quiere decir, las intuiciones se emplean como concepciones de anclaje y asimilación de una situación física representada y simulada en la mente. La representación imaginaria se afina para predecir el comportamiento del sistema físico representado. En este enfoque, al simular las representaciones imaginarias, los esquemas perceptuales y

motrices pasan de ser conocimiento implícito y no verbalizado, a conocimiento explícito verbalizado o no verbalizado.

Un proceso de transferencia de imágenes y capacidades de ejecución posibilita explicitar conocimientos implícitos (Clement,1988; 2003). Los esquemas motrices y perceptuales implícitos están encajados en modelos de sistemas físicos análogos. Es decir, los experimentadores poseen modelos mentales para simular representaciones imaginarias de sistemas físicos con los que están familiarizados; los modelos mentales son referencia para fundamentar el desarrollo de nuevos modelos y simulaciones. El modelo análogo fuente contiene criterios de simulación imaginaria -esquemas motrices y perceptuales, imágenes de objetos específicos y acciones ejecutables- propios; estos criterios fomentan el desarrollo de criterios semejantes al ser transferidos a una situación imaginaria nueva o de difícil comprensión.

En síntesis, al solucionar problemas en física tanto novatos como expertos construyen simulaciones a partir de intuiciones físicas; por razonamiento análogo se construyen modelos mentales nuevos semejantes a los esquemas motrices y perceptuales que subyacen a las intuiciones físicas del modelo análogo fuente. El modelo mental en construcción se afina conforme se ancla el sistema físico del problema a las intuiciones físicas referentes. Los experimentos pensados se ejecutan para afinar el modelo mental, 'observar' y predecir el comportamiento del sistema físico. Al observar y predecir el comportamiento del sistema físico se hacen explícitos los conocimientos implícitos contenidos en forma de esquemas perceptuales y motrices.

El enfoque de representaciones imaginarias presupone primero observar y después predecir el comportamiento del sistema físico. La

simulación toma lugar fuera del sistema lingüístico, se basa en acciones y percepciones imaginarias; posterior al proceso de visualizar el fenómeno, se traduce al lenguaje (Clement, 2008). Los expertos son hábiles para traducir la representación imaginaria a lenguaje, y los novatos verbalizan con menos eficacia sus observaciones y predicciones del sistema físico.

La expresión verbal es falible, puede ser una traducción lingüística defectuosa del esquema perceptual original; validar la solución del problema, del experimento pensado, siguiendo a Clement, depende del proceso de anclar y asimilar la situación física estudiada a las intuiciones físicas de referencia. Las intuiciones, al tener como base esquemas motrices y perceptuales con estructura y jerarquía, poseen criterios internos de evaluación, dotan con veracidad el proceso de anclaje y asimilación, tal que en automático se concibe lógico lo observado en la simulación imaginaria.

El enfoque de Clement nos muestra la validez en automático de los resultados de los EP gracias a las intuiciones físicas, a los esquemas motrices y perceptuales. Esta validez es producto de un resultado evidente, imaginado y observado en la mente; lo visual es traducido a un sistema lingüístico. Aunque Clement se adentra en las acciones individuales para validar y justificar los resultados de un EP, no alcanza a explicar lo que ocurre al traducir lo observado en lenguaje, las características o reglas de dicha traducción, ni por qué los expertos son más eficaces que los novatos al traducir.

Así como otras posturas disocian el concepto de la acción, el marco desarrollado por Clement disocia la acción del concepto. Las simulaciones de representaciones de sistemas físicos tienen primero un

estado imaginario y visual, donde se observan acciones sobre los objetos imaginarios del sistema físico representado; seguido, con conceptos se nombra lo observado. Por esto, se insiste de nuevo en reflexionar la relación acción-concepto bajo el precepto que los conceptos son operatorios y las acciones conceptuales.

Por otro lado, el alcance del enfoque desarrollado por Clement no va más allá de intuiciones físicas que tienen como base esquemas motrices y perceptuales; no obstante, en la experimentación pensada se manifiestan intuiciones de tipo conceptual e intelectual (Fischbeim, 2002; Mišćević, 2000; 2007; Nersessian, 2008; Szabó, 2010).

2.4 Verbalizar y explicitar al experimentar en el pensamiento

Tanto desde la cognición enraizada en el cuerpo como de las representaciones imaginarias, los resultados de los EP se validan en automático porque se basan en juicios autoevidentes que no requieren justificación. La diferencia entre estas posturas radica en la concepción de intuición. Mientras en la cognición enraizada en el cuerpo las intuiciones físicas son axiomas para inferir y predecir el comportamiento de un sistema físico, en las representaciones imaginarias las intuiciones son concepciones de anclaje para predecir, por razonamiento analógico, el comportamiento del fenómeno físico.

Por el contrario, desde el enfoque cognitivo adoptado en este trabajo, la intuición autojustificada y autoevidente no es criterio necesario y suficiente para validar el resultado de un EP. En el enfoque cognitivo el éxito del EP radica en la habilidad para movilizar conocimientos (Nersessian, 2008; Mišćević, 1992; 2007; Stuart, Fehige, Brown, 2018). Al explicitar conocimientos tácitos e implícitos, conforme se construye y

simula un nuevo modelo mental para la situación experimental, se fijan restricciones nuevas y particulares no contempladas en los esquemas y modelos perceptuales y motrices de referencia. Tales restricciones validan la simulación y sus resultados para el modelo mental recién construido.

Un problema, o situación experimental imaginaria, activa conocimientos previos que se movilizan para ejecutar el EP. De acuerdo con Nersessian (2002; 2008) y Mišćević (1992; 2007) durante la experimentación pensada ocurren operaciones de asociación y transformación de la información, tanto al construir y simular el modelo, como al establecer restricciones y rangos de validez para variar las circunstancias de la representación imaginada y para valorar los resultados observados.

Asociar y transformar la información proveniente del conocimiento previo movilizado sucede en la medida en que se relacionan las variables conceptuales del EP; asimismo, estas acciones siguen reglas de manipulación relacionadas al menos con cuatro aspectos (Mišćević, 1992): geometría del modelo, habilidades espaciales, saber cómo, y consistencia y coherencia del modelo. Siguiendo a Nenad Mišćević, hay poca evidencia empírica de estos aspectos por la dificultad para verbalizarlos. Al respecto, Nersessian (2008) destaca como problema nuclear conocer empíricamente los procesos que subyacen manipular representaciones internas con relación a su versión externalizada; por ejemplo, expone los casos de experimentadores que externalizan una conclusión correcta aun cuando el proceso de experimentación no lo es, igual a los hallazgos reportados con profesores de física en secundaria (Aisikainen & Hirvonen, 2014; Ozdemir, 2009) arriba descritos.

En resumen, el enfoque cognitivo considera activa la discusión sobre validar y justificar los resultados de los EP mientras siga siendo problema la relación entre representaciones internas y externas del experimentador (Nersessian, 2008). Tal problema implica estudiar y comprender la movilidad de conocimientos.

Antes se presentaron posibles soluciones desde dos enfoques cuyo interés no es la movilidad de conocimientos, pero al tratar cómo justificar y validar resultados de la experimentación pensada arrojan luz al proceso para explicitar y verbalizar conocimientos.

El enfoque representacional de Clement (2008) sugiere un estado inicial imaginario y visual del experimento pensado, cuyo resultado en formato de imagen mental dinámica se traduce a lenguaje; precisa mayor habilidad de los expertos para verbalizar sus experiencias físicas imaginarias, mientras los novatos son poco eficientes.

Suponiendo como Clement (2008) la manifestación de los resultados del EP primero en estado visual y después lingüístico, faltan evidencias sobre cómo se traduce lo visual a lenguaje, sobre las propiedades de acciones eficientes al verbalizar simulaciones de representaciones imaginarias, tal que dichas acciones se puedan reproducir en la formación de profesores y estudiantes de física.

No obstante, acción y concepto no parecen estar tan desligados como sugiere Clement. En la experimentación pensada se ejecutan acciones mentales para modificar las condiciones iniciales de un modelo y predecir posibles nuevos estados o comportamientos del sistema físico que el modelo representa (Nersessian, 2002). La variación de circunstancias es un acto central y no es trivial, es necesario saber qué variar del arreglo imaginario para dar coherencia y fortaleza a los EP

(Kujundzic, 1998; Mach, 1905; Mišćević, 1992; 2007; Nersessian, 2008). Variar exige del experimentador analizar los propios pensamientos para representar la realidad con coherencia (Kujundzic, 1998; Mach, 1905).

La otra posible solución está implícita en el trabajo de Reiner (2000). Si bien Reiner deja en claro las estrategias para ejecutar EP y comunicar resultados -los experimentadores describen el sistema físico como si la persona sintiera efectos mecánicos, estuviera en lugar de cuerpos específicos que constituyen el sistema o describiera el fenómeno físico con referencias corporales-, estas son producto de colaboración y negociación social.

El presente trabajo se ubica en el enfoque cognitivo para abordar el problema de la relación entre representaciones internas y externas del experimentador señalado por Nersessian (2008). En concreto, se propone desentrañar el 'algo' en la actividad discursiva de la movilidad de conocimientos en el contexto de los EP. Ese 'algo' subyacente -así planteado desde el primer apartado del presente capítulo- al construir, simular y verbalizar el modelo mental en el contexto de la experimentación pensada.

2.4 Pregunta de investigación

Con base en las reflexiones anteriores, el presente trabajo de tesis está guiado por los siguientes cuestionamientos:

¿Cuáles son los modelos movilizados por los profesores de física al experimentar en el pensamiento?, es decir, ¿cuáles son los modelos verbalizados y explicitados en el contexto de la experimentación pensada?

¿Cómo los profesores de física en secundaria movilizan sus conocimientos? Es decir, ¿cuáles son las acciones de los profesores para hacer explícitas ideas tácitas y usarlas al experimentar en el pensamiento?

2.5 Propósitos

Los propósitos del trabajo de tesis tienen como finalidad responder las preguntas anteriores:

Identificar los modelos movilizados por los profesores de física durante la experimentación pensada.

Construir un modelo de las acciones mentales de los profesores de física cuando explicitan modelos mentales en el contexto de la experimentación pensada.

Construir y organizar evidencia empírica para interpretar las acciones mentales de los profesores de física al movilizar conocimientos en el contexto de la experimentación pensada.

2.6 Justificación del trabajo

El presente trabajo trata sobre movilidad de conocimientos en el contexto de la experimentación pensada; se intenta conocer las acciones que los profesores de física en secundaria realizan al explicitar y verbalizar sus conocimientos al experimentar en el pensamiento. Con la evidencia empírica se busca explicar las acciones y propiedades de la movilidad de conocimientos para abordar la discusión sobre la relación entre representaciones internas y su traducción externa, sin pretender

finiquitar la discusión. Dos implicaciones se siguen de lo anterior: epistemológicas y didácticas.

La primera implicación invita a discutir cómo el saber inconsciente al ser verbalizado deviene explícito y consciente, tal que puedan determinarse propiedades de acciones efectivas para movilizar conocimientos en el contexto de la experimentación pensada. Acciones efectivas para movilizar conocimientos puede contribuir a vislumbrar cómo un experimentador traduce con eficacia sus representaciones internas en un formato de representación externa; a su vez entender mejor los procesos de transformación de la representación en representación externa encamina a dilucidar cómo se justifica y valida una conclusión de un EP y no simplemente asumir que poseen carácter autoevidente y autojustificado.

La implicación didáctica tiene carácter práctico. Completar un modelo de acciones que permitan comprender cómo los profesores de física verbalizan y hacen explícitos conocimientos, se alinea en los estudios cuyo objeto de estudio son procesos de razonamiento efectivo con potencial para reproducirse en la formación inicial y continua de los docentes de ciencias en secundaria.

Estudiar procesos de razonamiento docente efectivos tradicionalmente consiste en examinar el dominio general conocimiento de contenido que forma parte del conocimiento profesional docente. El conocimiento de contenido se define como cantidad y organización del conocimiento que posee un docente sobre la disciplina científica que enseña (Shulman, 1986); en el caso de la física, el conocimiento de contenido se distingue por ser similar al origen histórico de las ideas en física y por tener un carácter cualitativo (Deng, 2001).

Por lo general se emplean cuestionarios, evaluaciones estandarizadas, revisión de planes de clase y observación de la práctica para estudiar el conocimiento de contenido. Estos instrumentos tienen un enfoque centrado en las habilidades requeridas para aplicar grandes ideas de la física a temas específicos, y exhortan manipular conceptos de manera superficial (McConnell, Parker, & Eberhardt, 2013) o limitan a los docentes a reconocer información científica por medio de eliminar opciones.

El presente trabajo profundiza en los procesos, siguiendo a Vicente Talanquer (2015), para emplear los conocimientos y pensamiento en la práctica y no sólo describir sus conocimientos sobre un contenido en particular. En específico, interesan los procesos de los profesores de física para verbalizar y explicitar escenarios imaginarios para experimentar en el pensamiento; conceptos y principios físicos con los cuales variar y restringir las circunstancias experimentales; el modelo mental construido y simulado; y comunicar los resultados o predicciones de un sistema físico imaginario.

Aprender cómo hacer más eficaces las acciones o estrategias para verbalizar y explicitar representaciones internas en el contexto de la experimentación pensada, no sólo contribuirá a formar docentes con mayores habilidades para experimentar en el pensamiento, sino docentes eficientes para expresar y verbalizar sus representaciones internas de sistemas y fenómenos físicos.

Capítulo 3. Marco teórico. Naturaleza de los Experimentos pensados en física

Resumen del capítulo

El propósito del capítulo es doble. Por un lado, presentar el marco de discusión para los experimentos pensados (EP); se describe su historia y características generales; se caracterizan los EP en física y se distinguen de otras tareas cognitivas. Por otro lado, presentar y definir un marco conceptual que a su vez valgan de observables empíricos en la metodología y el trabajo de investigación; se precisan términos hasta ahora empleados como modelo teórico ideal, modelo mental, y movilidad de conocimientos.

Los EP en este trabajo se considerarán un tipo de construcción de modelo mental. Como tal, los EP están constituidos por información proposicional e icónica. La información se organiza y se transforma variando las circunstancias del fenómeno objeto de experimentación en el pensamiento.

Los modelos teóricos ideales son representaciones idealizadas de sistemas físicos que tienen valor epistemológico al ser ejemplo para la construcción de otros modelos. El modelo mental lo construye un individuo con base en modelar la realidad física desde su experiencia o la reconstrucción que hace del modelo teórico ideal.

Para Nenad Mišćević (1992; 2007) la movilidad de conocimientos es un proceso intelectual ligado a otros. Durante la experimentación en el pensamiento se efectúan intuiciones y

juicios que transitan de ser implícitas y no verbalizadas a ser explícitas y verbalizadas gracias a ese proceso de movilidad de conocimientos. Juan I. Pozo (2011; 2017) ofrece una lectura de la movilidad de conocimientos como el uso de representaciones de un dominio en uno nuevo. En este contexto, el nuevo dominio puede llevar a la construcción de nuevos conocimientos luego de pasar por un proceso de explicitación. Los niveles del proceso de explicitación representacional descrito por Pozo lleva a considerar la movilidad de conocimientos como un proceso de explicitación lingüístico complejo y consciente.

7.1 La tradición de la experimentación en el pensamiento

Experimento pensado, popularmente llamado experimento mental, tiene su origen académico en el término alemán *gedankenexperimente*. El vocablo *gedanken* puede traducirse como sustantivo y verbo: pensamiento, pensar. En el presente trabajo se escribe experimento pensado y experimentación pensada para referir al diseño experimental que se ejecuta en el pensamiento por medio del acto de pensar.

Gedankenexperimente fue acuñado por el físico danés Hans Christian Oersted en una conferencia durante 1811 para caracterizar un tipo de trabajo especial llevado a cabo por los físicos que, por entonces, pasaba desapercibido. El físico alemán Ernst Mach inició el estudio académico de este tipo de experimentación a fines del siglo XIX y principios del XX.

Mach se interesó por los experimentos pensados (EP) al reconstruir una historia crítica de la física. La tradición iniciada por Mach se popularizó en los años ochenta del siglo XX con discusiones sobre la naturaleza epistemológica y ontológica de los EP en diversas áreas de

conocimiento. Desde la filosofía política, la teología, biología, lingüística, matemáticas, estética, artes, entre otras disciplinas, se discuten las propiedades de los EP para diferenciar sus características frente a EP en otras áreas de conocimiento.

Desde cualquier disciplina el experimento pensado es herramienta de pensamiento con propósitos particulares (poner a prueba una teoría, suspender juicios, argumentar, ejemplificar, demostrar, contraargumentar). En cada disciplina existen ejemplos del remoto empleo de los EP, aunque en la antigüedad no se les reconociera como tal. Por ejemplo, los griegos se referían a los EP como *paradeigmas* y casos hipotéticos (Ierodiakonou, 2018). Los primeros eran casos análogos y ejemplos para argumentar o emitir juicios; los casos hipotéticos se caracterizaban por plantear problemas iniciando con expresiones tipo “supongamos que”, “qué pasaría si”. En el islam, durante la edad media, se empleó una particular forma de pensar similar a los EP, el *wham* o facultad estimativa (McGinnis, 2018). El *wham* tuvo sus máximos exponentes con Avicena y Alhacén, quienes lo emplearon en sentido idealizado y ficticio, esto es, situaciones mecánicas/no mecánicas y situaciones ficticias respectivamente. Asimismo, famosas y antiquísimas paradojas y aforismos propuestas por grandes pensadores se consideran EP (Weinert, 2016).

Para etiquetar como EP a instrumentos cognitivos empleados antaño y en la actualidad se considera sean herramientas de pensamiento, ideas o historias pensadas y diseñadas para “hacer estallar la intuición” (Dennet, 2015:14). El principal rasgo de los experimentos pensados, sin importar la disciplina de conocimiento, es su carácter heurístico y narrativo. Significa que los EP en general son una configuración o arreglo de ideas dentro de un marco de conocimiento

pensada para explorar las consecuencias de relacionar y hacer interactuar tales ideas. La heurística de los EP revela que poseen finalidades y objetivos particulares -poner a prueba teorías, solucionar o plantear problemas a las teorías y la realidad misma. El carácter narrativo de los EP implica exteriorizar y hacer público el ejercicio interno de experimentar con la configuración de ideas (Ruiz Sosa, 2012; Weinert, 2016). El experimentador, al explicitar y externalizar sus pensamientos en forma narrativa, invita a replicar el proceso de construcción de escenarios imaginarios en los cuales el conocimiento es puesto en acción.

Los EP al hacerse públicos se transforman en objeto de estudio; según el enfoque teórico desde el cual se les analice, poseen características singulares. Entre los enfoques más relevantes en la literatura se encuentran:

- a) Empírico: el experimento pensado es una serie de argumentos disfrazados con narrativa innecesaria. Desde esta postura, los EP son nuevas maneras de configurar el conocimiento previo, por lo que no son útiles para obtener nuevos conocimientos, pero sí para contraargumentar, ejemplificar o suspender juicios en discusiones lógicas. Entre sus principales representantes se encuentran John Norton (1996; 2004; 2016) y Sören Häggqvist (2009).
- b) Racional: todo experimento pensado es un detonador de la razón. Este enfoque *a priori* e idealista considera la posibilidad de obtener nuevo conocimiento con base en el diseño experimental imaginario. Los EP proporcionan bases para transitar de una teoría a su sucesora, pues el arreglo experimental exhibe la estructura y límites de la teoría puesta

a prueba. Su principal defensor es James Robert Brown (1986; 1991; 1996), y algunos trabajos de Tamar Szabó Gendler (1998; 2004).

- c) Naturalista: enfoque cognitivo donde los EP son un modelo mental. Experimentar implica simular el modelo a partir de construir secuencias de eventos representados por el modelo. El enfoque es una visión *a posteriori* de la naturaleza de los EP, y acepta la posibilidad de generar nuevo conocimiento porque el modelo se construye con conocimiento previo. Sus principales representantes son Nancy J. Nersessian (1992; 2008; 2018) y Nenad Mišćević (1992; 2007) y algunos trabajos de Tamar Szabó Gendler (2007; 2010).
- d) Trascendental o experimentalista: esta postura está limitada a ciencias experimentales. Los EP se conciben acoplados con los experimentos físicos ordinarios. Por un lado, los EP son atenuaciones de los experimentos ordinarios, es decir, pudieran ejecutarse en la realidad física, pero por diversas causas no se llevan a cabo. Por otro lado, anteceden al experimento ordinario, una especie de diseño mental del experimento físico. El conocimiento logrado con los EP se valida por la naturaleza, por la realidad física. Los principales representantes son Ernst Mach (1905) y Robert Sorensen (1992).
- e) Fenomenológico: posición teórica que concibe fundamental la experiencia de la primera persona (Wiltsche, 2018). El experimentador emplea los EP para adentrarse en la comprensión de un fenómeno o problema, y para proyectar al exterior su experiencia con el fenómeno, sin que ello implique resolver un problema. Los EP no son empleados para generar

conocimientos *per se*, sino para proyectar experiencias; son detonantes de intuiciones. Entre sus principales representantes se encuentran Daniel C. Dennet (2013), Harald A. Wiltsche (2018), Mohanty (1991), Kujundzic (1995) y Fehige y Wiltsche (2013).

Diversos enfoques comparten preocupaciones respecto a la naturaleza epistemológica de los EP sin importar si se diseñaron para pensar sobre inteligencia artificial, evolución, conciencia, libre albedrío o mecánica cuántica. Por decir, debates sobre EP exitosos y fallidos, relación imaginación-realidad y la posibilidad de la experiencia, vínculo entre previos y nuevos conocimientos, relación y correspondencia entre representaciones internas y externas, evolución de los EP en el tiempo y su potencial replicabilidad, la relación entre el *insight* y el EP, o cómo justificar los juicios emergentes en la experimentación pensada.

Ciertas disciplinas ponen más atención a una u otra inquietud. Por ejemplo, EP en filosofía se interesan menos por la relación entre imaginación y realidad representada en el experimento que por la relación entre conocimientos previos y nuevas formas de problematizarlo; tal es el caso al discutir la esencia de la identidad de los objetos con la nave Teseo para pretender arribar a nuevas comprensiones y significados de identidad, sin preocuparse en la posibilidad real de modificar la nave conforme la narración del EP. O en lingüística cognitiva cuyo interés está más centrado en la relación entre representaciones internas y externas que en el cambio y evolución misma del EP, como se manifiesta con el cuarto chino de Searle.

En el caso de los EP en física la inquietud está en la relación realidad-imaginación y el potencial de replicabilidad para comprender

cómo se justifican los juicios emergentes en la experimentación pensada. En física, se buscan diseños y configuraciones de EP similares a la realidad, una imaginación reglamentada por principios y leyes físicas. De lo anterior es posible discutir la idea de replicabilidad: un mismo EP ejecutado en diferente lugar y momento debería arrojar resultados similares porque a él subyacen principios físicos independientes de la subjetividad. EP realistas e independientes de la subjetividad tienen potencial para validar las conclusiones salientes.

3.2 Experimentos pensados en física

Iniciado el estudio académico de los EP en física se abordó el gran problema, cómo validar y justificar los resultados. En un comienzo Mach (1905) pensó el problema desde la relación entre realidad e imaginación; para el físico alemán la imagen -representación mental- no es trivial, juega un rol central en el método de experimentación pensada. Siguiendo a Mach, variar las circunstancias imaginadas es el eje sobre el que descansa el método de experimentación pensada. Variar implica manipular variables del sistema físico representado en la mente y fijar grados de validez para ello. Las imágenes, o representaciones mentales, son fundamentales para observar resultados y consecuencias por variar las circunstancias. En este sentido, no existe uso libre de la experimentación pensada, la imaginación está regulada y reglamentada por la realidad física y los principios que la rigen; estas restricciones proporcionan validez a los resultados experimentales en y con el pensamiento.

El físico francés Pierre Duhem contrapuso el término *expérience fictive* -experimento ficticio- a los *gedankenexperimente* para objetar las ideas de Mach. Duhem desdeña la imaginación en el contexto de la

experimentación pensada, la califica de parásito del pensamiento científico (Buzzoni, 2017). La experimentación ficticia, para Duhem, carece de precisión al emplear imágenes mentales y no realizarse en la realidad física; al no ser perceptible, es absurda. Duhem defiende la realidad física como portavoz del juicio de verdad; su positivismo acepta la idealización, esto es, uso legítimo de la imaginación inherente al diseño experimental ordinario y real, no más.

Mach también era positivista y en su respuesta a Duhem defendió la validez de juicios emergentes en los EP sólo por medio de la realidad física, tal que experimentar en el pensamiento no es absurdo, sino un proceso de pensamiento para construir conjeturas.

El debate entre Mach y Duhem entre realidad física e imaginación para validar los juicios o conclusiones emergentes de los EP en física se renovó con Alexandre Koyré (1973). A diferencia de Mach y Duhem, Koyré no realiza un análisis ontológico de los EP, a los cuales llama experimentos imaginarios. Koyré estudia los usos de los EP en la historia de la física al reconstruir y analizar problemas y resultados de conceptos y teorías germinales de la mecánica clásica moderna. En sentido estricto, Koyré rescata la importancia heurística de los EP en la evolución conceptual. Para él, la imagen en el pensamiento científico tiene relevancia porque encarna procesos creativos, y se preocupa menos por la validez de estas y los resultados de los EP.

Thomas Khun (1993) como Koyré reconoce el valor heurístico de los EP, y se pregunta a qué condiciones de veracidad deben ser sometidos los resultados de los EP en física (1993:264). Señala: “nada acerca de la situación imaginada puede ser completamente desconocido ni extraño” (Khun, 1993:275). Esto implica imaginar sistemas físicos

limitados por marcos conceptuales, por tanto, la imaginación no es libre, ficticia o fantasiosa, y de allí la veracidad de lo representado en la mente. Los EP son concebidos por Khun como instrumentos heurísticos para pensar mejor los sistemas conceptuales en interrelación con el mundo físico, de manera que enseñan “algo acerca de sus conceptos y también algo acerca del mundo” (*ibídem*, p. 276). Si bien con los EP se aprende algo acerca del mundo, debe entenderse que no aportan nueva evidencia empírica sobre el comportamiento del mundo físico; sólo cambia la forma en que se ve el mundo.

En la misma línea de Khun, David Gooding (año) defiende la existencia de una potencia empírica de los EP como propiedad emergente del entrelazamiento entre conocimientos conceptuales y experienciales. Tal interacción entre conocimientos proporciona elementos empíricos y conceptuales para validar los resultados del EP.

Estas ideas, a excepción de Duhem, suponen la posibilidad de replicar los EP y arribar, si no a las mismas conclusiones, sí a resultados similares. Las conclusiones emergentes carecen de valor empírico y quedan en espera de ser confirmadas y validadas por la realidad física; el pensamiento científico al ser una actividad creadora (Koyré, 2013) se vale de representaciones internas -imaginación- cuya principal utilidad es reaprender el mundo físico y explorar el potencial científico de las teorías físicas con nuevas configuraciones o arreglos. Pero tales ideas no lograron consenso con relación al cómo se justifican y validan los resultados de EP.

James Robert Brown (1986; 2011) postula la posibilidad de conocer el mundo físico desde los EP, ya que estos se validan en sí mismos como teorizaciones *a priori*. Brown (1986) explica, el

conocimiento gestado en la experimentación pensada es *a priori* y posibilita transitar desde una teoría hacia su sucesora en momentos de revolución científica. Según él, la transición entre viejos datos -sobre los que se diseña cualquier EP- y nuevas teorías -emergentes por experimentación pensada- se trata de un salto “relativamente pequeño” (Brown, 1986:4). Con base en esto, Brown elabora una taxonomía de EP: destructivos y constructivos. Los primeros exponen los límites de una teoría, argumentan en contra de ella y la destruyen. Los segundos destruyen una teoría y a la vez dan paso a una nueva de manera concluyente o conjetural; los EP concluyentes proporcionan bases para “un *a priori* transitorio desde la vieja teoría hacia su sucesora” (*ibídem*, 1986:14), en tanto los conjeturales muestran los absurdos de las viejas teorías y exponen la racionalidad de las creencias en una nueva teoría.

John Norton (1996; 2004; 2016), con una visión opuesta sobre los EP, defiende una postura empírica radical, las imágenes y los EP en sí mismos son irrelevantes. Para Norton, los EP son argumentos disfrazados con narrativa innecesaria, por tanto, no hay posibilidad de aprender algo nuevo sobre el mundo físico desde los EP, no existe un *insight*. Los EP al ser argumentos, sólo son útiles para persuadir al interlocutor. La validez de los resultados de un EP deberá juzgarse desde la lógica.

Los trascendentalistas reconceptualizan las posturas de Mach, Khun y Koyré, para proponer los EP en física como parte del experimento físico ordinario. Esta conceptualización implica la inexistencia de una teorización *a priori* contrario a lo defendido por Brown; en cambio, los EP son experimentos ordinarios atenuados, es decir, quedan en espera de ser confirmados por la experimentación física ordinaria. La justificación o validación de los resultados del EP está ligada a la generación de *insights*

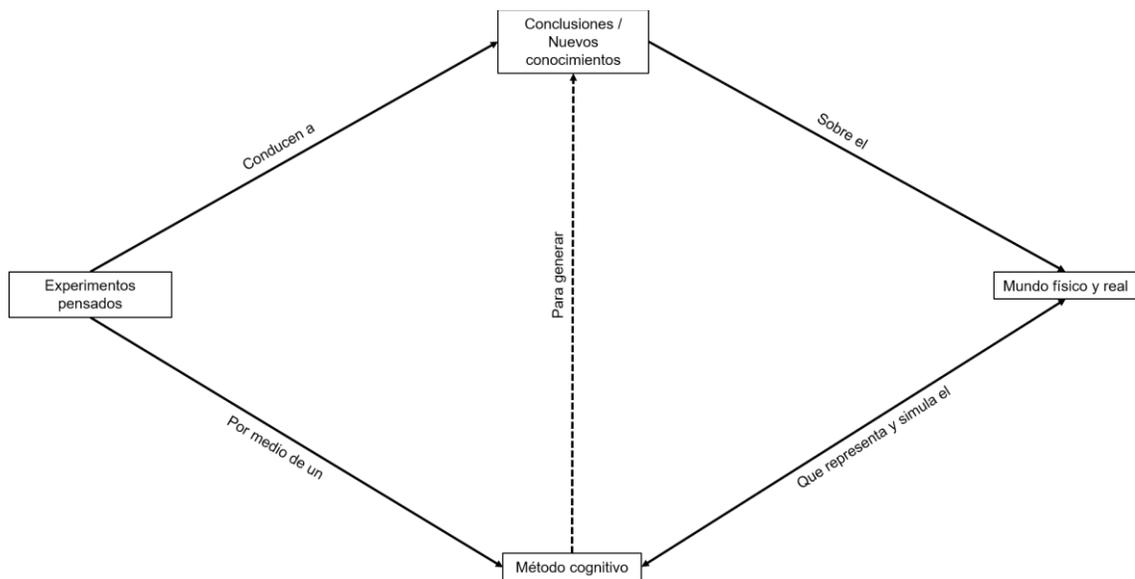
como argumentos a favor o en contra de la teoría puesta a prueba por el EP. Las imágenes contribuyen a visualizar el comportamiento de sistemas físicos al tiempo de diseñar arreglos experimentales ordinarios, ya que tales imágenes están sometidas a reglas lógicas conforme principios y teorías físicas.

Continuar la reseña y analizar el problema, discusiones, críticas y limitaciones en torno a cómo justificar y validar resultados de EP en física desde cada postura exige un trabajo en sí mismo -al respecto se recomienda revisar los escritos de Alisa Bokulich y Mélanie Frappier (2018), Michael T. Stuart *et al.* (2018), Nancy J. Nersessian (1991) y Tamar Szabó Gendler (2010).

Aquí se opta por conceptualizar los experimentos pensados como un tipo de modelo mental, por ello, a continuación, se revisa con más detalle esta postura naturalista, no sin antes ponderar que los diversos enfoques coinciden en resaltar la replicabilidad del EP en física como propiedad -o *identidad* según Alisa Bokulich y Mélanie Frappier (2018)- fundamental. La replicabilidad del EP es de carácter cognitivo (Nersessian, 2008), esto es, la reproducción de una misma línea de procesos de razonamiento de la experimentación pensada por diferentes experimentadores. La replicabilidad es posible por verbalizaciones y representaciones externas facilitadas por el experimentador a sus pares a modo de guía. Las características de replicabilidad cognitiva del EP consideradas como necesarias y suficientes para los procesos de validar y justificar resultados dependen del enfoque epistemológico, aunque se pueden clasificar conforme su naturaleza narrativa y teórica.

3.3 El experimento pensado como modelo mental

El problema de cómo justificar y validar resultados de la experimentación pensada en física es relevante para aceptar y comprender cómo procesos mentales, de naturaleza cognitiva e inmaterial, proporcionan información sobre el mundo físico y material (Esquema 3.1). Los experimentos pensados conducen a conclusiones o juicios sobre el mundo físico por medio de un método cognitivo que representa y simula la realidad física. De acuerdo con el enfoque de interpretación de los EP, el método para generar conclusiones experimentales enmarca la experimentación pensada misma y los elementos necesarios para justificar y validar resultados.



Esquema 3.1.1 Problema de justificación y validez de los resultados de EP

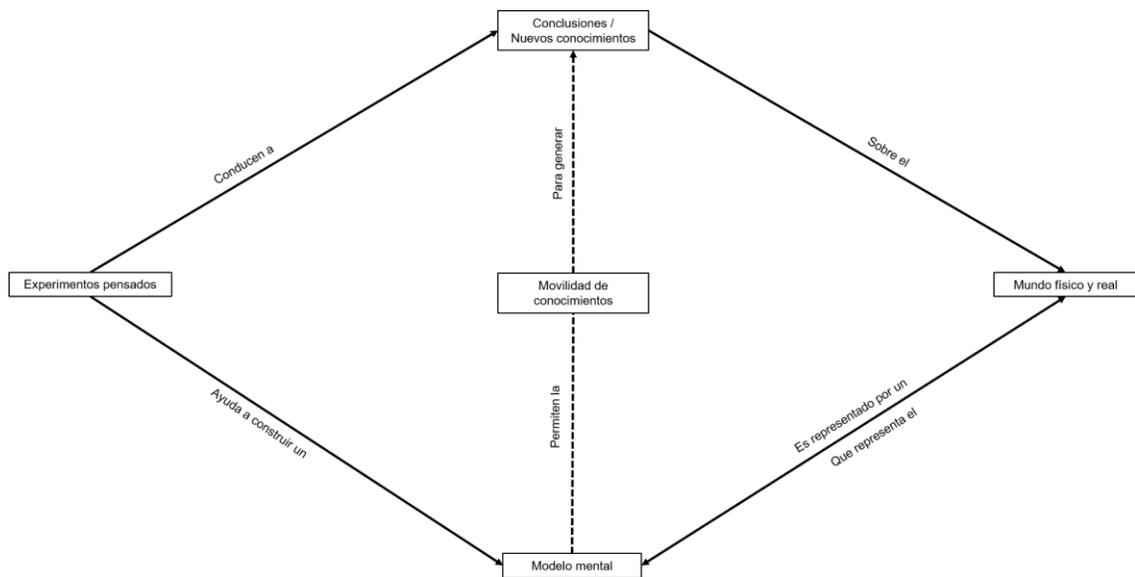
La replicabilidad cognitiva, según el consenso subrayado antes, es necesaria en el proceso para validar y justificar los resultados del EP por medio de la replicabilidad del método cognitivo empleado. La replicabilidad cognitiva está en función de cómo son interpretados los elementos narrativos y teóricos. Por ejemplo, para los trascendentalistas y empiristas los elementos teóricos poseen mayor relevancia como

método experimental, y por tanto la validez y justificación de los resultados experimentales descansan en inferencias lógicas desde componentes teóricos. Mientras los trascendentalistas distinguen en la narrativa el medio para visualizar el sistema físico y en las leyes y principios físicos el medio para replicar predicciones sobre los estados futuros del sistema, empiristas como Norton ignoran los elementos narrativos y proceden con métodos puramente lógicos. Los racionalistas como Brown interrelacionan por igual elementos narrativos y teóricos; la narrativa proporciona *insights* cognitivos que dan paso a los saltos relativamente pequeños entre teorías; la narrativa permea con flexibilidad los EP y complica la genuina replicabilidad cognitiva. El enfoque fenomenológico da primacía a la narrativa y la experiencia personal del agente experimentador, complicando también una genuina replicabilidad cognitiva. El enfoque naturalista concibe en igualdad la narrativa y la dimensión teórica del EP, sin embargo, al concebir los EP como modelos mentales, al construir y simular el modelo de experimentación convergen diversos procesos de pensamiento en los que, según el proceso, es el momento en que un conjunto de elementos se superpone al otro.

Mucho se ha discutido sobre el método subyacente a la experimentación pensada en física. Para Ernest Mach (1905), variar circunstancias imaginadas es método básico; Brown (1986; 1991), identifica el pensar como método mismo; Szabó Gendler (2004) describe el método como procesos de razonamiento. Desde el enfoque naturalista se integran estas visiones al interpretar los experimentos pensados como casos de construcción y simulación de modelos mentales en el que intervienen diversos procesos de pensamiento (Miščević, 1992; Nersessian, 1992; 2008; 2018). Los EP, al ser modelos mentales, son instrumentos cognitivos que permiten movilizar conocimientos con la

finalidad de pensar de manera organizada sobre la realidad física. Esto supone aceptar la experimentación pensada como representación concreta de la realidad física y sus fenómenos. Por tanto, la experimentación pensada consiste en movilizar conocimientos con un propósito concreto sobre un escenario imaginario -representación interna de la realidad física.

El Esquema 3.2 presenta el método de experimentación pensada en el enfoque naturalista: un modelo mental que permite movilizar conocimientos (Mišćević, 1992; 2000; 2001; 2007; Nersessian, 1992; 2018; Stuart *et al.* 2018).



Esquema 3.1.2 Enfoque naturalista para abordar el problema con los EP

Más allá de comprender la movilidad de conocimientos como el proceso para explicitar y verbalizar ideas tácitas durante la experimentación pensada, no hay un consenso claro sobre 'El método' de experimentación. En la concepción naturalista aquí adoptada, los EP se asocian más a procesos de *replicabilidad cognitiva* (Nersessian, 2008)

que a un método riguroso (Esquema 3.3). Los procesos son: (1) identificar un problema o hipótesis para someter a prueba; (2) construcción de un escenario imaginario con componentes que representan un fenómeno físico; (3) ejecución del experimento en el escenario imaginado relacionando los componentes que lo integran; (4) explorar consecuencias de relacionar y variar componentes como parte de la experimentación e identificar resultados; (5) emitir juicios sobre la repercusión del experimento en las propias estructuras de conocimiento o la realidad física.



Esquema 3.1.3 Método naturalista de experimentación pensada

(1) implica identificar y plantear una situación problemática, solucionar un problema, analizar una situación contraintuitiva o emitir hipótesis para someterlas a prueba. Esto es, fijar el propósito para la experimentación pensada.

(2) se refiere a imaginar el escenario imaginado (Miščević, 1992; Nersessian, 2008; Szabó 2010), es decir, construir una representación interna del sistema físico y sus propiedades para experimentar en la memoria de trabajo. Se identifican contenidos teóricos y empíricos recuperados de la memoria, mismos que intervienen en la situación imaginada para trabajar vías explícita e implícita.

En (3) se relacionan diferentes componentes o elementos de la representación imaginaria (teóricos, abstractos, físicos o materiales). Las relaciones establecidas siguen las experiencias de los experimentadores, por lo que están restringidas por reglas tácitas, y son de naturaleza cuasi

sensorial (Miščević, 1992; 2000; 2001; Nersessian, 2008; Szabó 2004). En este sentido, cualquier variación del escenario imaginado, y de cada uno de los componentes representados mentalmente, gesta secuencias del comportamiento del sistema físico simuladas mentalmente. Es común que el experimentador se adentre en su experimento y lo transforme (Quintero, 2011; Reiner; 1998; Ruvalcaba, 2016).

(4) es el momento en el que el experimentador piensa y explora las consecuencias de relacionar distintos componentes del sistema. Si en (3) se gestan y simulan secuencias de comportamiento del sistema físico, en 4 se percibe lo que ocurre por transformar o variar el arreglo imaginario. Con otras palabras, al simular secuencias del sistema físico, el experimentador, por vía cuasi perceptiva, se percata de los estados futuros del sistema (Clement, 1988; 2003; 2008; Miščević, 1992; Nersessian, 199; 2008; Szabó 2004; 2010). Llegado a este punto, el experimentador se hace consciente de las interrelaciones establecidas entre diversos componentes imaginados y las reglas con las que operan dichas interrelaciones y secuencias.

En (5) se verbalizan y explicitan en la medida de lo posible los pensamientos construidos en 3 y 4; aquí ocurre la movilidad, se traducen representaciones internas a externas (Clement, 2003; 2008). Externalizar los pensamientos permite al experimentador emitir juicios o conclusiones que, aunque carentes de valor empírico, son cuasi observaciones del comportamiento del mundo físico y sobre la propia estructura de conocimientos del experimentador (Miščević, 1992; Quintero, 2011; Szabó 2004; 2010).

A través de todos los procesos descritos, el experimentador construye un modelo mental, lo simula y explicita propiedades salientes

al explorar las consecuencias de simular el modelo. El modelo facilita estudiar la estructura y propiedades del experimento pensado y no sólo el proceso de experimentación pensada. El modelo mental se entiende como forma particular de organizar información que representa el mundo físico al realizar tareas cognitivas (Miščević, 1992; Nersessian, 1992; 2008). El modelo mental no es imagen isomórfica de la realidad que se califica de exacto o inexacto (Giere 1988; 1999; Nersessian; 2008), en cambio, es representación parcial de la realidad cuyo valor está dado por su similaridad o semejanza con dicha realidad. El modelo está restringido por la habilidad perceptual del experimentador para abstraer elementos de la realidad física (Nersessian, 2008).

Los modelos mentales son más que relaciones semánticas entre diversas entidades (Giere, 1988; 1999; Miščević, 1992; Nersessian, 1992; 2008); al ser representaciones similares y parciales de la realidad, se construyen mediante componentes proposicionales/icónicos y símbolos modales/amodales (Nersessian, 2008; 2018).

Los componentes proposicionales son el conjunto de elementos teóricos; provienen de información abstraída desde *modelos teóricos ideales* (Giere, 1988; 1999), representaciones matemáticas, principios, teorías y leyes físicas; se califican con juicios de verdad y su finalidad es restringir el escenario imaginario con el cual se experimenta.

Los componentes icónicos son el conjunto de elementos narrativos; son abstracciones perceptuales y sensoriales cuyo formato representacional suelen ser visualizaciones mentales, no necesariamente imágenes. Se califican de exactos o inexactos, y proporcionan mayor o menor similaridad al sistema físico objeto de la experimentación pensada.

Los símbolos modales son “representaciones análogas de los estados perceptuales desde los cuales son abstraídos” (Nersessian, 2008:98). Los amodales son representaciones abstractas a las que se han transferido los estados perceptuales. De acuerdo con Nersessian (2008), los componentes proposicionales se constituyen con símbolos amodales, mientras los icónicos con símbolos modales y amodales.

La habilidad del experimentador para combinar y variar la información proposicional/icónica y modal/amodal del sistema físico representado en el pensamiento, le ayuda tanto a construir y simular el modelo mental como a predecir los estados futuros del sistema. Al experimentar en el pensamiento puede ocurrir que la información proposicional y amodal predomine sobre la icónica, tal que los modelos mentales construidos y simulados refieren a modelos teóricos ideales más que a la realidad física (Giere, 2012; Ruvalcaba Cervantes, Gómez Galindo y Quintero Zazueta, 2017). En este sentido, es preciso distinguir entre modelo teórico ideal y modelo mental. El primero es parte del conjunto de modelos de una teoría científica, de la cultura humana y el saber objetivado; el modelo mental es una construcción personal durante tareas cognitivas cuyo referente puede ser la realidad física representada o un modelo teórico ideal. El modelo teórico ideal alude a objetos abstractos e idealizados más que a objetos reales (Giere, 1999), posee valor heurístico para elaborar otros modelos con los cuales se puedan hacer generalizaciones empíricas o abstractas (Giere, 1988, 1999) en el contexto de diversas tareas cognitivas.

Los modelos mentales, además de constituirse por diversos componentes, poseen otras características (Mišćević, 1992; Nersessian, 2008): estáticas, temporales, cinemáticas, dinámicas e interactivas. La propiedad estática describe relaciones entre diversos componentes; la

temporal describe secuencias de cambio de un arreglo estático a otro, o sea, variaciones del modelo objeto de experimentación pensada; la cinemática es la secuencia animada, esto es, simulación de la configuración del modelo durante un período de tiempo; con la dinámica se explican las relaciones causales implicadas en el fenómeno objetivo de experimentación pensada; la propiedad interactiva indica la necesidad de interacción entre componentes para construir y simular modelos mentales más similares al sistema físico, en contraste con representaciones esquemáticas y amodales.

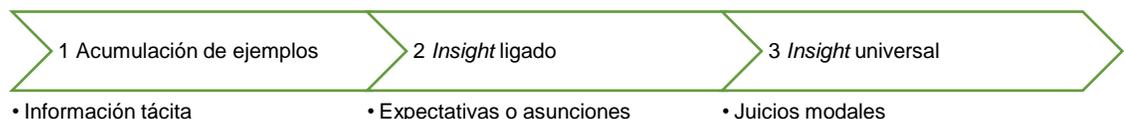
Las propiedades de los modelos ayudan a movilizar conocimientos de naturaleza tácita e implícita que, si bien no son nuevos, para el experimentador se presentan como tal al tiempo de verbalizarlos y hacerlos explícitos (Miščević, 1992; 2000; 2001; Szabó, 2004; 2010). Tales saberes suelen ser representaciones perceptuales, visuales, modales, y no estarían disponibles si la tarea cognitiva de experimentar en el pensamiento no incluyera aspectos narrativos (Clement, 1988; 208; Miščević, 1992; 2000; 2001; 2007; Nersessian, 1992; 2008; 2018; Reiner & Gilbert, 2000; 2008; Szabó, 2004; 2010).

3.4 La movilidad de conocimientos

Desde el enfoque de los modelos mentales se mencionan habilidades de movilidad de conocimientos (Miščević, 1992; 2000; 2007; Nersessian, 2018; Stuart *et al* 2018), y *fuerza de movilidad* (Miščević, 2007) para referirse al proceso de explicitar ideas tácitas e implícitas implicadas en EP. La noción de movilidad es similar al proceso de traducción de representaciones internas a externas de Clement (2008) presentado en el capítulo anterior.

El enfoque naturalista carece de claridad y precisión para explicar acciones mentales propias de la movilidad de conocimientos. La falta de un modelo cognitivo, entendido como el modelo de acciones cognitivas que representan el mecanismo de la movilidad de conocimientos, plantea problemas al enfoque naturalista para establecer criterios de validez y justificación a resultados de la experimentación pensada y para propiciar la replicabilidad cognitiva.

Según Nenad Mišćević (2000; 2007) la intuición es el mecanismo de la movilidad de conocimientos. Define la intuición (Mišćević, 2000:88) como “respuesta que produce una creencia fenomenológicamente inmediata, acompañada de un sentimiento de obviedad y certidumbre”. La intuición es producto y estado cognitivo de carácter fenomenológico (Mišćević, 2007), ello sugiere diferentes tipos de intuición conforme el sistema físico objeto de experimentación pensada. Los estados cognitivos de la intuición al movilizar conocimientos son tres (esquema 3.4): acumulación de ejemplos, *insight* ligado e *insight* universal.



Esquema 3.1.4 Estados cognitivos de la intuición de acuerdo con Mišćević (2007)

El estado de acumulación de ejemplos es el asociar contenidos y su semántica a diversos casos, tal que un contexto intuitivo será similar y semánticamente cercano al contexto usual o cotidiano (Mišćević, 2007), es decir, es un estado cognitivo relacional o asociativo de verdades reales tácitas. La base de ideas relacionadas da cabida a expectativas del comportamiento de sistemas físicos; el *insight* ligado son estas expectativas, asunciones implícitas que el experimentador transforma en

contenidos proposicionales por medio de juicios de verdad aparente. Finalmente, el experimentador restringe los alcances de estos juicios buscando contraejemplos, y emite juicios modales fenomenológicos con carácter de verdad necesaria.

Explica Mišćević (2000; 2007), el conocimiento tácito deviene proposicional y explícito, cuando, de manera consciente, se aplican representaciones en problemas concretos. Tales representaciones poseen cantidades (*chunks*) de información estructuradas y jerarquizadas, y dotan con certeza y obviedad al proceso de explicitar verdades reales como juicios modales.

La propuesta de Mišćević se reduce a explicar la movilidad por medio de procesos intuitivos, *insights* de naturaleza *a posteriori*. La intuición en Mišćević tiene una base sensorial y perceptual como la intuición física de John Clement (1988; 2003; 2008) reseñada en el capítulo anterior, y al igual, adolece de un mecanismo o modelo de cómo se traducen las representaciones internas (verdades tácitas para Mišćević) en representaciones externas (juicios modales según Mišćević). De hecho, abiertamente Mišćević (2007) sostiene la naturaleza distante de los mecanismos intuitivos; en consecuencia, sólo se puede conocer el resultado de la intuición más no el mecanismo intuitivo.

La naturaleza del mecanismo cognitivo por el cual se entrelazan las representaciones internas y externas, de acuerdo con Nersessian (2008), sigue siendo un gran problema por resolver. La investigadora propone la memoria para abordar este vínculo, y resalta la importancia de externalizar representaciones para favorecer y restringir procesos de

razonamiento al construir y simular modelos mentales como los experimentos pensados.

Nersessian (2008) no aborda el problema de la movilidad en sí misma, su atención está centrada en procesos de razonamiento al construir y simular modelos mentales. Analiza cómo los agentes experimentan con dominios de conocimiento de referencia, por ejemplo, modelos teóricos ideales, y dominios objetivos del fenómeno o sistema físico de estudio. Los procesos de razonamiento analizados por Nersessian son abstracción, simulación, evaluación, adaptación y construcción del modelo, en los cuales los agentes restringen dominios de referencia y dominios del fenómeno objetivo, tal que el nuevo modelo se construye a partir de externalizar y manipular representaciones que a su vez restringen y favorecen procesos de razonamiento con la finalidad de construir el modelo del fenómeno objetivo; el modelo deberá valer por su propia estructura, restricciones, dinámica, interacción y organización representacional, e independencia respecto a los dominios de referencia.

El trabajo de Nersessian ayuda a interpretar la movilidad de conocimientos como parte de un proceso en espiral: los dominios de referencia estimulan procesos de razonamiento para generar representaciones internas, a su vez éstas se hacen externas -se movilizan- para iniciar a conformar el modelo del fenómeno objeto de estudio; las representaciones externas restringen y facilitan otros procesos de razonamiento, dando paso a otras representaciones internas, mismas que son externalizadas -movilizadas- y continuar con la construcción del modelo del fenómeno de experimentación. Así, el proceso es una espiral para simular, evaluar, adaptar y construir el modelo final.

El proceso para hacer externas y explicitar las representaciones internas estaría mediado por la memoria según Nersessian (2008), pero, de acuerdo con ella, es un problema abierto. En la psicología cognitiva del aprendizaje, Juan Ignacio Pozo (2001; 2011; 2017) emplea la idea movilizar conocimientos en el contexto de procesos para recuperar y transferir conocimientos aprendidos a nuevas situaciones. La movilidad estaría vinculada a las memorias de trabajo y a largo plazo.

Las representaciones, en este contexto, se recuperan y transfieren para explicitarlas con fines representacionales complementarios (Pozo, 2017) -extender, modificar y reorganizar. La postura de Pozo sugiere una idea de movilidad en la cual se explicitan aprendizajes almacenados en la memoria con el fin de generar nuevos aprendizajes que comienzan en la memoria de trabajo.

Pozo (2001; 2011; 2017), siguiendo a Annette Karmiloff-Smith (1992), expone niveles progresivos de explicitación representacional en los que están inmersos procesos de recuperación y transferencia: implícito (I), explícito no consciente (E1), explícito consciente y no verbalizado (E2), explícito consciente y verbalizado (E3).

El nivel implícito se caracteriza por representaciones de naturaleza procedimental y no disponibles para tareas cognitivas, por lo tanto, las representaciones no pueden ser separadas en componentes útiles como dominios de referencia. La explicitación E1 es propia de representaciones simbólicas disponibles en la memoria, pero no para la conciencia; son de valor cognitivo al ser recuperadas por representaciones explícitas E2 y E3 y redescibirse como representaciones verdaderamente explícitas y conscientes. En la explicitación E2 la persona es consciente de sus representaciones,

aunque no puede informar de ellas con formatos lingüísticos y sí con diagramas, expresiones miméticas o cinestésicas. El nivel E2 provee de representaciones que pueden descomponerse para tareas cognitivas y emplearse como dominios de referencia para facilitar la construcción de modelos mentales. Es hasta el nivel E3 que una persona puede informar, vía lingüística, sobre la representación, los componentes de esta, y las transformaciones realizadas.

En este trabajo se adopta la explicación de niveles de explicitación representacional porque ayuda a concebir la movilidad de conocimientos en el contexto de la experimentación pensada como proceso lingüístico consciente y complejo. Adoptar los niveles de explicitación representacional, por un lado, supone el costo de aceptar procesos de transformación, reorganización y modificación representacional distantes al investigador, y por otro, reconocer y explicitar un par de implicaciones.

La primera, al explicitar ideas tácitas e implícitas en el contexto de la experimentación pensada, significa poner en acción representaciones con finalidad de operar, transformar, reorganizar y modificar representaciones de referencia, parafraseando a Nersessian, sobre un dominio objetivo. A lo cual subyace una asunción, movilizar conocimientos se generan conclusiones que proporcionan al experimentador la sensación de ser nuevos; el experimentador representa un fenómeno físico y aprende sobre él. Explicitar, además de ser una ventana a las propias estructuras de conocimientos, informan de características físicas que el experimentador mental no había percibido. Lo descrito aquí está relacionado con afirmaciones propias del enfoque naturalista cuando se postula que las representaciones se presentan al experimentador como nuevas al tiempo de explicitarlas (Miščević, 1992; 2000; 2001; Szabó, 2004; 2010).

En segundo lugar, al reconocer la movilidad de conocimientos como proceso complejo y de orden superior, la experimentación pensada se piensa como tarea cognitiva compleja de orden superior a distinguirse de otras tareas cognitivas de menor exigencia.

3.5 Lo que no son los experimentos pensados en física

Experimentar en el pensamiento es más complicado de lo que parece. Usualmente suele aceptarse que un EP se constituye de una narración restringida por contenido científico; no obstante, los EP no se definen exclusivamente por la narración restringida, también por el proceso mismo de experimentar en y con el pensamiento.

Se está asumiendo la experimentación pensada como tarea cognitiva de orden superior, compleja y consciente, por ello, se distingue de experimentos imaginarios (Brown, 1986; 1991); simulaciones mentales (Özdemir, 2009; 2014) y simulaciones pensadas (Aisikainen & Hirvonen, 2014). Los experimentos imaginarios apuntan situaciones con observaciones experimentales que podrían ejecutarse, pero no se llevan a cabo porque no se exploran; en otras palabras, se construye un modelo mental que representa la situación física y se sugieren posibles variaciones del modelo sin manipularlo. La simulación mental es un modelo que representa percepciones físicas sin obtener conclusiones a partir de él; la simulación mental se limita a ser una representación interna animada y dinámica del sistema físico. Y finalmente, una simulación pensada ilustra un fenómeno físico; significa que el potencial experimentador visualiza en la mente una representación del fenómeno sin problematizar o buscar solución a un problema, ya porque conoce de antemano el EP, ya porque se limita a leer e imaginar la situación con la

descripción explícita del experimento sin necesidad de pensar variaciones como acto deliberado.

El EP es un instrumento que permite movilizar conocimientos mediante la construcción de un modelo mental, pero no se limita a construir dicho modelo; una característica esencial es explorar las consecuencias de manipular y variar el modelo, explicitar y verbalizar restricciones implícitas, así, el modelo inicial se transforma, se refina para lograr mayor similitud con el fenómeno físico.

Lo anterior comprende concebir el acto de pensar como propiedad esencial de la experimentación pensada. Pensar como acto cognitivo e intencional dirigido hacia un propósito específico -solucionar o crear un problema, poner a prueba una hipótesis, argumentar, etcétera.

Capítulo 4 Metodología y estudio inicial

Resumen del capítulo

Para responder las preguntas de investigación se decidió llevar a cabo un estudio cualitativo e interpretativo desde el enfoque metodológico teoría fundamentada (*grounded theory*), por lo que la principal característica del trabajo es construir hipótesis, desde los datos mismos, más que ponerlas a prueba.

El estudio se realiza en dos fases, inicial y final. La primera es un acercamiento empírico al problema de la movilidad de conocimientos en dos etapas: una informal con la finalidad de seleccionar un repertorio de experimentos pensados (EP) para trabajar; y otra formal con entrevista *think aloud* para explorar evidencia empírica de la movilidad de conocimientos en contextos de experimentación pensada. La fase final del trabajo se discute en los siguientes dos capítulos.

El propósito del capítulo es mostrar un sumario o síntesis de lo aprendido con base en las dos etapas de la fase inicial de la investigación. Los resultados iniciales tuvieron repercusiones metodológicas y empíricas reseñadas en los últimos dos apartados del capítulo. Algunos ejercicios del trabajo de análisis que guiaron las reflexiones del capítulo se encuentran en los anexos.

6.5 Enfoque metodológico

El problema de la movilidad de conocimientos en el contexto de experimentación pensada se emprende desde la teoría fundamentada (TF), enfoque metodológico que alienta generar hipótesis más que ponerlas a prueba (Corbin & Strauss, 2014); el proceso para construirlas

consiste, primero en desarrollar categorías de análisis y sus propiedades, y después hipotetizar interrelaciones entre categorías.

La teoría fundamentada incita al desarrollo de marcos conceptuales explicativos de fenómenos humanos y sociales, por ende, se evita aplicar un marco teórico y conceptual para leer datos empíricos. Iniciar una investigación desde un enfoque teórico, como el naturalista adoptado aquí, supone extender, desarrollar o repensar la estructura y esquema teórico, conforme el progreso de la interpretación de datos (Corbin & Strauss, 2014).

Los marcos explicativos se desarrollan gracias al nivel analítico alcanzado por las categorías construidas desde los datos mismos; las categorías tienen la función de estimular el pensamiento con la finalidad de refinar tales categorías con las cuales se busca explicar y comprender el objeto de estudio. Es un proceso hermenéutico, un ir y venir entre datos y categorías.

La TF descansa sobre la interpretación, herramienta para dar significado a los datos; la interpretación se instrumentaliza en método por medio de la comparación constante y preguntar para codificar datos empíricos -los códigos describen categorías y sus propiedades. Una mejor descripción del método para construir categorías de análisis se revisa en el siguiente capítulo.

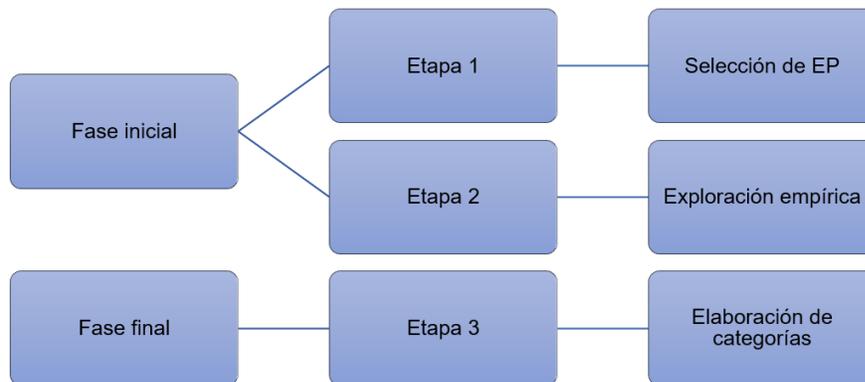
El enfoque se adopta para reconstruir acciones propias de tareas cognitivas y representarlas como modelos cognitivos. Estos últimos representan modelos de las acciones de los profesores, experimentadores, al explicitar y verbalizar representaciones internas y tácitas. Los modelos se validan con su propia estructura, correspondencia con los datos y propiedades internas - consistencia,

saturación y comparación constante- (Chi, 1997; Corbin & Strauss, 2014; Willis, 2015). Los modelos de las acciones de tareas cognitivas son construcciones *bottom up*, esto es, se elaboran desde fragmentos de datos etiquetados con base en elementos comunes o en la naturaleza de las acciones cognitivas de una tarea (Willis, 2015). Sin embargo, como se advirtió desde el Capítulo 2 con otros términos, se tiene presente que los procesos de tareas cognitivas se ven influenciados por, y a su vez influyen, los contenidos de las representaciones implicadas (Chi, 1997). Esta asunción sugiere la necesidad de complementar la elaboración de categorías y sus interrelaciones con modelos de los contenidos representacionales movilizados. Para ello, se emplean taxonomías o códigos teóricos preconfigurados, gestados en el enfoque naturalista de los experimentos pensados, para mapear u operar los datos. La finalidad es doble, por un lado, se extienden los alcances explicativos de estos códigos (Corbin & Strauss, 2014), y por otro, se tienen elementos para valorar la coherencia y estructura de los modelos de acciones al realizar tareas cognitivas (Chi, 1997; Willis, 2015).

6.6 Estudio inicial

De acuerdo con la teoría fundamentada, de ser necesario, los instrumentos de investigación se depuran a la par de los códigos que describen categorías y propiedades de estas, en especial en etapas iniciales al interpretar los datos, cuando el desarrollo de códigos y su operatividad está en ciernes. Previendo esto, el presente estudio consta de dos fases, inicial y final (esquema 4.1). La primera es un acercamiento empírico al problema de la movilidad de conocimientos en dos etapas, con la finalidad (etapa 1) de seleccionar y afinar experimentos pensados

(EP) por emplear en la fase final del estudio, a la vez, iniciar (etapa 2) una exploración de la evidencia empírica de la movilidad de conocimientos en contextos de experimentación pensada. La fase final del trabajo, discutida en los siguientes dos capítulos, refleja el proceso de análisis al elaborar e interpretar categorías de análisis de la movilidad del conocimiento para dar respuestas concretas a las preguntas de investigación.



Esquema 4.1 Fases del trabajo de investigación

La etapa 1 se trabajó en talleres informales con estudiantes de posgrado; se emplearon diversos EP para seleccionarlos conforme criterios elaborados con base en la revisión de la literatura (Tabla 4.1). Asimismo, se buscó que los EP representaran algún capítulo importante de la historia de la física (mecánica clásica, termodinámica, mecánica cuántica). De los talleres informales se reporta el trabajo efectuado con dos EP -uno de ellos con dibujos- en el inciso a) del apartado 4.2.3.

Tabla 4.1 Criterios preliminares para selección de EP

Experimento:

	Sí	No	¿Es un experimento clásico? Justificar	Conocimiento previo necesario para la solución	¿Cómo se ponen en juego / se trabajan las ideas y conocimientos?	Número de soluciones posibles
Criterios	Elementos narrativos*					
	Los objetos/escenarios imaginados son dinámicos**					
	Al menos se puede controlar mentalmente una de las variables					
	Busca solución a una cuestión					
	Es crucial al interior de una teoría					
	Exige poner en juego una serie de conocimientos					
	No se reduce a una serie de argumentos					
	Su solución no necesariamente exige cálculos					
	El sistema no es totalmente explícito***					
	Algunos constituyentes del sistema imaginado no son visibles****					
	El sistema imaginado se mantiene constante/variable					

* Permiten construir el escenario imaginado

** Se pueden manipular para hacerlos dinámicos

*** Por ejemplo no se hace mención de ciertas fuerzas o la energía

**** Como las partículas que constituyen la materia

La etapa 1 tuvo propósitos de exclusividad instrumental (seleccionar EP), en cambio, la etapa 2 estuvo guiada por propósitos instrumentales y teórico-metodológicos; se buscó refinar el repertorio de EP empleados, enriquecer la estrategia de entrevista, y comenzar a explorar evidencia empírica de la movilidad de conocimientos.

La etapa 2 consistió en una entrevista *think aloud* formal e individual con profesores de física en secundaria; se utilizaron cuatro experimentos pensados cuyo contenido disciplinar fue el mismo y seleccionados de acuerdo con lo aprendido en la etapa 1. Se reportan los resultados de 3 entrevistas en el inciso b) del apartado 4.2.3.

La fase final del estudio no se describe aquí, pues los siguientes dos capítulos corresponden a ello.

4.2.1 Los participantes

Dado que la etapa 1 se realizó por medio de taller y de manera informal, los participantes se seleccionaron con base en la conveniencia de la investigación -estudiantes de posgrado en Ciencias en Matemática Educativa (1 de maestría y 3 de doctorado).

Para el trabajo formal se buscaron participantes cuyo perfil correspondiera a los criterios de selección de los profesores a participar en la fase final del estudio. Se buscaron profesores de física de secundaria de acuerdo con los siguientes criterios:

- Máximo 10 años de servicio docente al momento de las entrevistas, tal que los participantes hayan ingresado al servicio profesional docente mediante evaluación de ingreso (conocido por examen de oposición).

- Formación inicial en escuela normal superior, egresados de la Licenciatura en educación secundaria con especialidad en física.
- Formación inicial en el marco del Plan de Estudios 1999 para tal licenciatura.

En la fase inicial, etapa 2, se trabajó con 5 profesores de física en secundaria.

4.2.2 Entrevista *think aloud*

La entrevista *think aloud* es la vía para estudiar los pensamientos emitidos por participantes al resolver problemas o ejecutar tareas cognitivas; Jacqueline P. Leighton (2017) las define como vía narrativa para acercarse a inobservables actos intersubjetivos de procesos superiores de pensamiento. La finalidad del *think aloud* (TA) es explicitar y obtener evidencia empírica de procesos cognitivos, tales como actos a través de los cuales se externalizan representaciones internas y tácitas.

Dado que el participante articula pensamientos para materializar procesos de pensamiento al realizar tareas cognitivas, se sugiere que las tareas eviten la complejidad y sencillez extremas (Leighton, 2017), en cambio, deben fomentar la transformación de información de un estado a otro (Chi, 1997; Leighton, 2017; Nersessian, 2008), por ejemplo, la experimentación pensada que conlleva construir y simular modelos mentales.

La entrevista TA consiste en solicitar al participante articule sus pensamientos en voz alta sin editarlos (Leighton, 2017), esto es, sin preocuparse por la coherencia y consistencia de las ideas; se exhorta al

entrevistado evitar silencios mayores a 3 segundos, de incurrir, se invita a seguir hablando. Al inicio de la entrevista TA se sugiere especificar y hacer explícita la instrucción de las acciones que se espera lleve a cabo el participante: explica, piensa, imagina, resuelve, etc.

Lo dicho por el participante se graba, se transcribe y se elabora un reporte verbal, o sea, “una narración de los pensamientos expresados” (Leighton, 2017:12). El reporte verbal captura las acciones mentales propias de las inferencias realizadas principalmente en la memoria de trabajo (Leighton, 2017; Willis, 2015); por lo cual, es guía material para efectuar la replicabilidad cognitiva y así reproducir las líneas de pensamiento seguidas por los profesores durante la experimentación pensada.

El TA facilita entablar relaciones entre contenidos de las representaciones puestas en acción en tareas cognitivas y las acciones mismas (Leighton, 2004; 2017), preocupación planteada desde el capítulo 2. Por otro lado, desde el TA se elaboran modelos cognitivos de las acciones realizadas durante tareas específicas, los cuales se revisan y ajustan con posteriores entrevistas para diseñar y evaluar las inferencias o interpretaciones gestadas en estos modelos cognitivos (Leighton, 2004). Así, la etapa 2 de la fase inicial del trabajo busca, con ayuda del TA, construir evidencias para comenzar a elaborar modelos de las acciones propias de la movilidad de conocimientos, y ajustar estas ideas en la fase final del estudio.

Una preocupación y crítica a la entrevista TA es la potencial falta de correspondencia entre los modelos cognitivos construidos y los procesos de pensamiento reales en la mente de los entrevistados. De acuerdo con Leighton (2004), la desconfianza no subyace al proceso de

pensar en voz alta *per se*, sino en los instrumentos empleados para propiciar la articulación de pensamientos. Las consideraciones para aumentar la confiabilidad en los instrumentos o tareas por emplear en las entrevistas son las siguientes.

- a) Las tareas empleadas en entrevistas TA, además de ser de complejidad media, deben propiciar estados de conciencia sobre la tarea en ejecución.
- b) La tarea o instrumento será de mayor confianza si propicia pensamientos verbalizados espontáneos y no retrospectivos.
- c) Rehuir el inducir ideas o pensamientos, ya por el entrevistador o las instrucciones de la tarea misma.

4.2.3 Resultados de la fase inicial

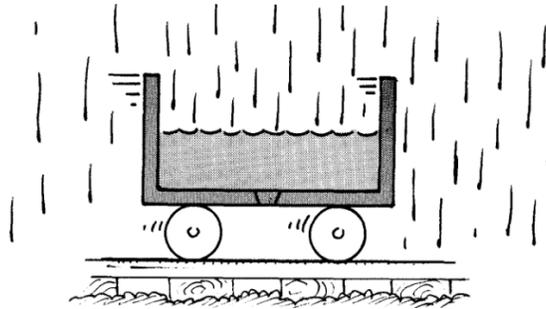
a) Resultados del trabajo informal en taller

En la etapa 1 del trabajo, en talleres informales con duración de 2 horas por experimento pensado (EP), se aplicaron diversos EP para elegir aquellos que cumplieran determinados criterios (Tabla 4.1). El propósito fue meramente instrumental para seleccionar aquellos EP de complejidad media para los participantes.

El presente apartado describe el trabajo con dos EP empleados - y los resultados obtenidos- tomados de Lewis Carroll Epstein (1995:87) y de Yákov Perelman (1971:48-49); el primero de ellos se acompañó de una imagen y se presentó de la siguiente manera:

Experimento Pensado 1 empleado en taller informal (EP1T)

“Durante una fuerte lluvia que cae de manera completamente vertical, un carro abierto de ferrocarril se mueve sin fricción por su vía. Conforme avanza el carro va acumulando agua en su interior. ¿Cómo se ve afectado el movimiento del carro?”



El segundo experimento pensado (Perelman, 1971), se presentó con la siguiente redacción:

Experimento Pensado 2 empleado en taller informal (EP2T)

“Durante la primera guerra mundial la artillería alemana lanzó sobre París más de trescientos proyectiles. Tales bombas fueron lanzadas por primera vez desde una distancia mayor a 100 km. De hecho, el fuerte alemán desde el cual se lanzaron los proyectiles estaba ubicado a 115 km de la capital francesa. Inicialmente los alemanes durante una prueba buscaban alcanzar objetivos ubicados a 20 km, pero al lanzar con mayor velocidad inicial la bomba lograron rebasar la distancia esperada, consiguieron nada menos que una distancia de 40 km. Al revisar lo ocurrido pudieron determinar el cómo alcanzar la capital francesa desde su fuerte. Narre alguna o algunas posibilidades que determinen cómo debió ocurrir el lanzamiento considerando

que al aumentar la velocidad inicial del lanzamiento aumenta la resistencia del aire”.

Ambos EP se proyectaron en plenaria y se pusieron a discusión grupal, un EP por sesión. Cada participante exponía sus pensamientos de manera alternada conforme quisiera participar. Las sesiones fueron audio grabadas para su revisión.

Con el EP1T se rescatan dos respuestas de un par de participantes a modo de sumario dado el propósito de presentar lo aprendido en la etapa 1 y el carácter informal de la misma (el sumario es más amplio en Ruvalcaba Cervantes, 2016).

En la respuesta 1 (R1) se dijo “el carro se detendría por la acumulación de agua”, sin embargo, también se aseveró no tener certeza, pues debido a la falta de fricción, el carro nunca se detendría. Entonces, supuso el primer participante, se movería cada vez más lento. En la respuesta 2 (R2), el participante indicó que debería moverse cada vez más rápido porque acumula más agua y la masa aumenta, por lo tanto, incrementa la inercia del carro. Luego de expresar su respuesta (R2) el segundo participante expresó que no sabía en realidad qué ocurriría, pues la R1 le parecía lógica.

Al solicitar hacer explícitas y compartir en plenarios las razones que llevaron a R1 y R2, comenzaron a aparecer elementos teóricos y narrativos no presentes en la presentación del EP1T. Por ejemplo, para llegar a R2 el participante dijo imaginar el carro en una pendiente, pues eso le sugirió la imagen. Al compartir pensamientos en plenaria genera la influencia de unas ideas sobre otras, tal que R1 es modificada para afirmar que el carro se moverá cada vez más lento, mientras R2 se

mantiene (el carro se moverá con mayor rapidez), sin embargo, el participante que emitió R2 limita sus participaciones.

Cada participante introduce contenidos teóricos diferentes en sus reportes verbales al restringir el comportamiento del carro, por lo que se llega a conclusiones opuestas. En el caso de la R1, la respuesta inicial es modificada por la relectura del EP1T y abstraer de ella el elemento teórico “sin fricción”.

Para el caso del EP2T se presenta otro sumario con tres resultados (para más detalles ver Ruvalcaba Cervantes, Gómez Galindo y Quintero Zazueta, 2017), resultado A (RA), B (RB) y C (RC).

RA fue expresado por un participante cuyo referente fue el tiro parabólico ideal a 45° . Para el participante, la bala se debió lanzar a 45° con algunas restricciones, una bala aerodinámica con punta cónica y el aire comportándose como agua dentro de una alberca.

El RB interpretó la situación como “caso ejemplar de parábola”. A modo de conjetura se afirmó, para una “mayor distancia el ángulo (de lanzamiento) tiene que ser mayor”. En este caso, el participante no describió una representación imaginaria de la situación, en cambio, trazó diversas gráficas con base en la fórmula de la parábola para poner a prueba su conjetura y encontrar la medida del ángulo.

El RC propuso disparar el proyectil a 45° e imprimirle una gran cantidad de energía cinética para alcanzar el objetivo a través de una vía orbital, para ello el cañón debía disparar el proyectil luego de ser puesto en movimiento a lo largo de un riel.

En el RB se evaluó, por prueba y error, los resultados de trazar parábolas en un cuadrante del plano operando con tres elementos

teóricos (ángulo de lanzamiento, distancia y altura máxima), aunque no se encuentra la medida del ángulo de lanzamiento; se sugiere (Ruvalcaba Cervantes *et al*, 2017) la falta de un referente para ligar la conjetura con un sistema real y útil para valorar la medida del ángulo. Mientras tanto, los RA y RC tienen como referente el modelo teórico ideal de tiro parabólico, desde el cual abstraen la medida del ángulo de lanzamiento, y asocian esta información con otros elementos teóricos y narrativos para conjeturar el comportamiento de la bala para alcanzar el objetivo conforme la presentación del EP2T.

b) Resultados de entrevistas (*think aloud*) en fase inicial

Posterior a las diversas aplicaciones de experimentos pensados en taller se decidió trabajar con EP de caída libre para la etapa 2 de la fase inicial. Para la etapa 2 se trabajó de manera individual con cada docente. Cada sesión tuvo duración promedio de una hora, se audio grabó y transcribió por completo.

En síntesis, las entrevistas iniciaron por presentar a los profesores el propósito del trabajo de tesis; explorar nociones de y explicar lo que es un experimento pensado; solicitar emitir en voz alta todo pensamiento y aclarar que se invitaría a seguir hablando de aparecer un silencio mayor a 3 segundos. Se entregó uno a uno cada experimento pensado en una hoja de papel con la narración; se facilitaron hojas blancas, lápices y colores por si era necesario representar icónicamente lo expresado por vía oral.

Los experimentos pensados en la segunda etapa (EPSE) utilizados fueron:

EPSE1

“El filósofo griego Aristóteles distinguió la existencia de cuerpos ligeros y pesados. De acuerdo con Aristóteles los cuerpos caen con una velocidad directamente proporcional a su peso.

Con base en lo pensado por Aristóteles podemos imaginar la siguiente situación. Imagine dos cuerpos, uno pesado y otro ligero, que se dejan caer desde la misma altura y al mismo tiempo. Para ambos cuerpos la resistencia del aire es constante e igual.

Posteriormente imagine que el cuerpo ligero es atado al cuerpo pesado. Este nuevo cuerpo, llamémosle compuesto, se deja caer desde la misma altura de la cual se dejaron caer los cuerpos por separado. La resistencia del aire sigue siendo constante e igual.

Describa cómo sería la velocidad de caída del cuerpo compuesto en comparación a los cuerpos del primer escenario imaginado. En caso de pensar más de una manera para describir la velocidad del cuerpo compuesto, redacte cada una de ellas.

En caso de ser necesario dibuje, trace gráficos, haga los cálculos que requiera.

Mencione los conocimientos que utilizó para describir la velocidad de caída del cuerpo compuesto.

Emplee la cantidad de hojas que considere necesarias.”

EPSE2

El 3 de septiembre de 1760 el matemático Leonhard Euler escribió una carta a una princesa alemana redactándole la famosa historia de cuando a Isaac Newton le cayó una manzana. En un fragmento de la carta se puede leer lo siguiente: “Encontrándose un día este gran filósofo y matemático inglés tendido en un jardín, bajo un manzano, le cayó una manzana sobre la cabeza proporcionándole la ocasión de hacer diversas consideraciones. Supuso que era la pesantez la que había hecho caer la manzana, tras haberse desprendido ésta de la rama, tal vez por el viento o por cualquier otra causa. Esta idea parecía muy natural y todo campesino hubiera hecho tal vez la misma consideración, pero el filósofo inglés fue más lejos. Se planteó la cuestión de qué ocurriría si el árbol fuera mucho más alto, si en ese caso la manzana también caería, cosa de la que no podía dudar.

Pero si el árbol hubiera sido tan alto que llegara hasta la Luna, se sentía confundido ante la decisión de si la manzana caería o no”.

Imagine la situación pensada por Newton y narrada por Euler y describa qué ocurriría con la manzana y su estado de movimiento cuando el árbol sea tan alto que llegue a la Luna. En caso de pensar más de una posible descripción, redacte cada una de ellas.

En caso de ser necesario dibuje, trace gráficos, haga los cálculos que requiera.

Mencione los conocimientos que utilizó para describir qué ocurriría a la manzana y su estado de movimiento.

Emplee la cantidad de hojas que considere necesarias.

EPSE3

Una persona ubicada en el polo norte de la Tierra se vio decidida a construir allí un túnel que atravesara verticalmente el planeta teniendo su otra apertura en el polo terrestre opuesto. Tal túnel pasa exactamente por el centro de la Tierra y la divide en dos hemisferios iguales, occidental y oriental. Cuando la persona por fin terminó su obra y la admiraba observando a través del túnel comía una manzana. Estando en ello se le ocurrió que dejaría caer la manzana por el túnel para observar qué ocurría al movimiento y peso de la fruta a través de dicho túnel.

Describa lo que la persona observaría sobre el movimiento y peso de la manzana. En caso de pensar más de una descripción de lo que la persona observaría, escríbalas.

En caso de ser necesario dibuje, trace gráficos, haga los cálculos que requiera.

Mencione los conocimientos que utilizó para describir qué ocurriría con el movimiento y peso de la manzana.

Emplee la cantidad de hojas que considere necesarias.

Los resultados se presentan sintetizados redactados como sumario. En el Anexo 1 y 2 se encuentran un manuscrito para la revista *Enseñanza de las Ciencias* y algunos ejemplos de ejercicios de análisis

de las entrevistas, bases sobre las cuales se construye el sumario del presente apartado.

En la etapa 2 de la fase inicial se transcribieron las entrevistas para generar reportes verbales los cuales se procesaron en dos niveles de análisis: reconstrucción de modelos mentales movilizados, acciones de movilidad de conocimientos al explicitar los modelos mentales.

Para reconstruir los modelos mentales se analizaron los reportes verbales al aplicar cuatro categorías de análisis propias del enfoque naturalista de los experimentos pensados:

- *Información proposicional.* Frases cuyo referente es un modelo teórico de caída libre; los enunciados en los que subyace contenido científico son de carácter verdadero o falso.
- *Representación icónica.* Oraciones cuyo contenido son entidades y objetos del sistema físico representado en la mente, sin ser exclusivamente representaciones visuales.
- *Transformación de la información.* Expresiones que indican acciones cognitivas realizadas por los docentes al construir y operar sus modelos.
- *Entidades teóricas.* Son enunciados para describir propiedades teóricas de la información proposicional e icónica (masa, velocidad, peso); son las variables o restricciones para operar el modelo mental.

El segundo nivel de análisis reconstruye las acciones de movilidad de conocimientos para identificar momentos en que se construye, opera y exploran consecuencias de manipular el modelo mental. El análisis

procedió conforme el enfoque teoría fundamentada (preguntas, codificación y comparación constante) empleando el *software* Atlas.ti 7.

Los modelos mentales identificados en el EPSE1 son aristotélicos y galileanos¹:

(1a) Modelo aristotélico. La velocidad de caída libre de un cuerpo es directamente proporcional a su masa.

(1b) Modelo aristotélico: la velocidad de caída que adquiere un cuerpo está determinada por su forma y en relación proporcional inversa con la resistencia del aire, tal que la forma del cuerpo puede contribuir en mayor o menor medida a romper dicha resistencia.

(1c) Modelo aristotélico: la rapidez de caída de un cuerpo es directamente proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del aire.

(1a') Modelo galileano. La velocidad y tiempo de caída de los cuerpos son variables dependientes de la gravedad de la Tierra, mientras que la masa de los cuerpos resulta inoperante. Por lo tanto, velocidad y tiempo de caída libres son directamente proporcionales a la fuerza de gravedad.

(1b') Modelo galileano: cuerpos que caen simultáneamente desde la misma altura adquieren igual velocidad de caída

¹ El número denota el número de experimento pensado y la letra al participante. Por ejemplo, 2a refiere al modelo mental del segundo experimento pensado ejecutado por el profesor A. Los modelos como 1a' representan el segundo modelo puesto en acción en el primer experimento pensado realizado por el participante A.

independientemente de sus masas, tal que al suelo llegan al mismo tiempo.

(1c') Modelo galileano: en ausencia de aire la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por la constante de atracción gravitacional terrestre. En presencia de aire la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por su forma y la constante gravitacional, y es inversamente proporcional a la resistencia del aire.

Los modelos mentales en el EPSE2 son:

(2a) La velocidad de caída de la manzana está determinada por la masa y energía potencial acumulada.

(2b) La velocidad de caída de la manzana es directamente proporcional a la fuerza gravitacional de la Tierra e inversamente proporcional a la gravedad de la Luna.

(2c) La atracción entre la manzana y otro cuerpo es directamente proporcional a la gravedad del segundo cuerpo e inversamente proporcional a la distancia que separa ambos cuerpos.

Los modelos mentales del EPSE3 son:

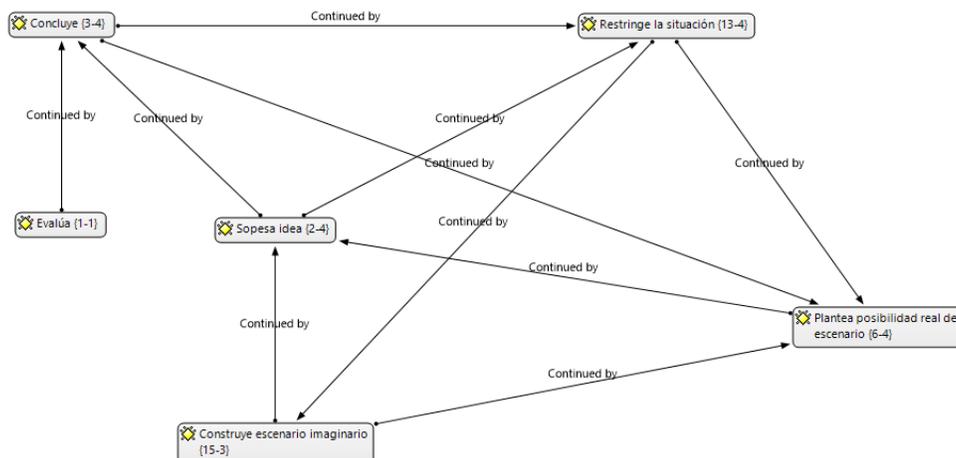
(3a) La velocidad de caída de la manzana es directamente proporcional a su peso (producto de la atracción gravitacional de la Tierra); y la manzana se detendría de inmediato justo en el extremo opuesto del túnel.

(3b) La manzana cae en línea recta por el túnel con una aceleración directamente proporcional a la gravedad de la Tierra.

(3c) Es preciso definir qué es arriba y abajo para determinar el comportamiento de la manzana.

Con relación a las acciones para identificar la movilidad de conocimientos, se ordenaron términos y frases indicativas de procesos para transformar información. Con ayuda del *software* Atlas.ti se redujeron los reportes verbales a citas o “unidades significativas (de información) más manejables” (Muñoz & Sahagún, 2017:42), las cuales se agrupan de acuerdo con sus características para constituir códigos y estos en categorías de análisis. Expresiones tipo “pienso que”, “sonaría ilógico”, “con las condiciones que tenemos”, “me imaginé”, “se supone” definen las propiedades de estas categorías construidas desde los datos.

Al trabajar con citas se construyeron categorías asociadas en redes para representar las acciones docentes al experimentar en el pensamiento. Las acciones ayudan a visualizar de manera ordenada el proceso experimental seguido por cada docente, no la movilidad en sí misma; por ejemplo, el esquema 4.2 representa las acciones del docente A al experimentar con el EPSE2.



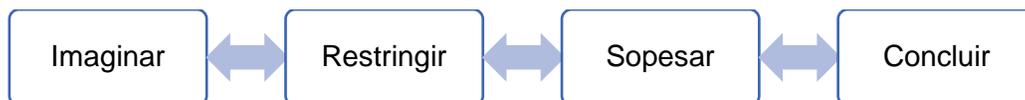
Esquema 4.2 Acciones de experimentación pensada docente A EPSE2

La red se construyó siguiendo el ejercicio de análisis en el Anexo 2. Se aprecia que el proceso de experimentación pensada del participante A no es lineal, sino una compleja interacción entre actos simultáneos como imaginar el escenario, restringirlo, sopesarlo (reflexionarlo), plantearlo como posibilidad real, concluir y evaluar.

Cada categoría posee el número de citas asociadas y sus relaciones con otras categorías; por decir, A expresó 15 frases para construir el escenario, y la construcción del escenario se relaciona con 3 categorías o acciones simultáneas (restricción del escenario, sopesarlo y plantearlo como posibilidad real).

La red ayuda a visualizar que el 70% de las verbalizaciones del docente A se utilizaron para describir el escenario imaginario (37.5%) y restringirlo (32.5%), y sólo el 5% de las expresiones indican reflexión (sopesar ideas).

Al contrastar las categorías desarrolladas desde los reportes verbales de cada docente de física al trabajar con cada uno de los experimentos pensados en la etapa 2 (las redes correspondientes entre cada profesor y experimento pensado se pueden ver en algunos de los ejercicios de análisis desarrollados en el Anexo x) se encuentran similitudes, tal que se pueden asociar para conformar familias de categorías (esquema 4.3).



Esquema 4.3 Familia de categorías de acciones de la experimentación pensada

Así como la red del esquema 4.2 muestra la no linealidad de la experimentación pensada de A, el esquema 4.3 representa la

experimentación pensada como un proceso donde ocurren acciones simultáneas desde el imaginar hasta el concluir; sin embargo, con propósitos de exponer y clarificar, se describe cada categoría en orden y por separado, no sin advertir que cada docente que participó en la entrevista siguió un proceso distinto a sus pares, como se aprecia en el manuscrito del Anexo 1. Por ejemplo, algunos imaginan y concluyen parcialmente, mientras otros, imaginan y restringen.

Imaginar. Son locuciones empleadas para describir las representaciones mentales de la situación física objeto de experimentación.

Restringir. Son enunciados para explicitar información teórica o icónica empleada para restringir inconsciente o conscientemente los modelos mentales. Se restringe al dotar con agencia a una entidad teórica o física, lo que determina variables independientes y dependientes; por ejemplo, en el modelo mental 2b la velocidad de caída de la manzana de Newton está en relación proporcional directa con la gravedad de la Tierra y en relación proporcional inversa con la gravedad de la Luna. De acuerdo con la restricción establecida es la conclusión a la que se llega (ver Anexo 1).

Sopesar. Son sentencias que expresan reflexión en torno a modelos o ideas empleadas para restringir el escenario imaginario, y dilucidar la pertinencia de adoptar una idea o modelo para construir el modelo explicativo final. Por ejemplo (ver Anexo 1), para concluir el EPSE1 los participantes A y B sopesan los modelos 1a y 1b con 1a' y 1b' respectivamente por medio de comparar modelos contrastantes de caída libre, mientras el

docente C sopesa por medio de imaginar dos escenarios distintos para la caída libre, con ausencia y presencia de aire.

Concluir. Son afirmaciones definitivas para predecir el comportamiento futuro del sistema físico objeto de experimentación pensada.

Las categorías asociadas en esquemas implica interpretar la movilidad como hacer explícita y verbalizar información en diferentes momentos, y finalidad distinta, de la experimentación pensada; significa que se puede distinguir entre movilizar contenidos representacionales para imaginar la situación, restringir la situación, sopesar las consecuencias de restringir el escenario con determinadas condiciones o variables, y otros tipos de movilidad correspondientes a acciones concretas del proceso de experimentación pensada. A la vez supone interpretar la movilidad -verbalizar información tácita e implícita- con diversos niveles de complejidad, aspecto por comenzar a desarrollar en el apartado 4.4 y discutirse en el capítulo 6.

4.3 Implicaciones del estudio inicial para efectuar ajustes metodológicos

a) Implicaciones de la etapa 1 de la investigación (taller informal)

Los resultados del taller tuvieron implicaciones directas para el trabajo formal en las entrevistas *think aloud* en la etapa 2 del trabajo. Los resultados ayudaron a tomar decisiones respecto a los experimentos pensados por emplear y sobre cómo trabajarlos en entrevista.

En primer lugar, se decidió proceder la segunda etapa con entrevista *think aloud*, y dar al entrevistado toda la libertad de manifestar sus pensamientos con relación a experimentar con una situación imaginaria, e influir lo menos posible en sus intervenciones. El EP1T sirvió para reparar en la influencia de un agente sobre otro, tal que el último limita sus participaciones a lo que se espera que exprese. Por ejemplo, la respuesta 2 (R2) estuvo limitada por la 1 (R1), en consecuencia, el segundo participante restringió sus intervenciones porque la idea R1 le parecía lógica. En el mismo sentido, se decidió emplear EP sin imágenes para injerir lo menos posible en la configuración de los sistemas físicos imaginarios, por ejemplo, en el EP1T dos partícipes reconocieron representar un escenario físico sugerido por la imagen complementaria del EP.

Con base en el EP2T se decidió incorporar papel y lápiz a la entrevista, ya que en el proceso de la respuesta B el participante trazó diversas parábolas, haciendo evidente la necesidad de complementar las locuciones con representaciones escritas para tener una versión más completa de las acciones efectuadas al verbalizar y explicitar sus pensamientos.

En segundo lugar, se decidió trabajar con EP de caída libre por dos razones: 1) emplear EP de complejidad media cuyo contenido base sea un modelo teórico ideal elemental y popular para los docentes; 2) contar con elementos que ayuden a identificar cuando la experimentación pensada se reduce a evocar y reproducir un modelo teórico ideal, con otras palabras, tener control metodológico.

La razón 1) se sigue de considerar los resultados A y C del EP2T cuyo referente es un modelo teórico ideal de tiro parabólico, y el RB

procede por prueba y error interpretando la fórmula de la parábola; es decir, EP2T es familiar. En cambio, las respuestas 1 y 2 del EP1T no exhiben un modelo teórico ideal referente, lo cual no indica que la situación deba ser etiquetada como compleja o sencilla, sin embargo, no es familiar. La falta de familiaridad con la situación propuesta para la experimentación pensada se asume como factor que pone en riesgo la conciencia y atención requerida durante la entrevista *think aloud*, pues al estar ausente un referente concreto el entrevistado podría perder conciencia del problema de experimentación y centrar el pensamiento en recuperar información de la memoria a largo plazo, acción que requiere mayor esfuerzo cognitivo en contraste con tareas cognitivas en la memoria de trabajo (Pozo, 2001; 2011).

La razón 1) asume la caída libre como contenido familiar para los docentes porque es materia de enseñanza en los temas “El trabajo de Galileo” y “Efectos de las fuerzas en la Tierra y en el Universo” de los Bloques I y II del programa de Ciencias 2011 de la Secretaría de Educación Pública, plan vigente al momento de recolectar los datos; y porque es objeto de sugerencias didácticas en recursos didácticos para profesores (SEP, 1994; 2011).

La razón 2) para trabajar solo EP de caída libre descansa en la necesidad de vigilar y verificar no se reduzca la experimentación pensada a sólo evocar un modelo teórico ideal propio de la simulación pensada. Trabajar el mismo contenido con situaciones experimentales pensadas diversas permite tener elementos empíricos para discernir entre experimentación pensada genuina y el evocar y reproducir contenidos representacionales de caída libre.

b) Implicaciones de la etapa 2 de la investigación

Los resultados de la entrevista *think aloud*, cuya finalidad era comenzar el trabajo empírico formal para explorar evidencia sobre movilidad de conocimientos, repercutió en las direcciones metodológica y empírica.

Desde el trabajo en taller se comenzó a percibir la importancia de la narración empleada para presentar los EP y la necesidad de mejorar la narrativa para estimular la transformación y manipulación de los escenarios imaginarios y sus elementos constituyentes -teóricos e icónicos- (Ruvalcaba Cervantes, 2016; Ruvalcaba Cervantes *et al*, 2017). Con las entrevistas se consolidó dicha idea (ver Anexo 1) al observar dificultades por parte de los docentes para imaginar las diversas situaciones de caída libre y la agencia para experimentar en el pensamiento. Además, las entrevistas ponen en duda la cantidad de información que poseen los docentes sobre caída libre; algunos reportes verbales ponen de manifiesto que la experimentación pensada y las verbalizaciones no van a la par (Ruvalcaba Cervantes *et al*, 2017), por ejemplo, verbalizaciones retrospectivas y no espontáneas -contrario a las sugerencias de la entrevista *think aloud*- o en los constantes silencios e ideas incompletas.

La dificultad para imaginar significa nimia recuperación de elementos de la memoria para representar el fenómeno físico objeto de experimentación pensada y resistencia imaginativa (Szabó, 2010). Ya se mostró (Clement, 1988; 2003; Gendler, 2007; 2010; Mišćević, 1992; Nersessian, 1988, 2002; 2008) la importancia narrativa para estimular cuasi observaciones de fenómenos físicos al recuperar elementos de la memoria que facilitan procesos de razonamiento no propiciados por

información amodal. La resistencia imaginativa revela incredulidad en la situación planteada, por lo que hay desdén explícito a imaginar lo narrado.

Las dificultades de agencia al experimentar en el pensamiento significan reducido compromiso por parte de los docentes para explorar las consecuencias de construir y operar su modelo mental, tal que la experimentación pensada queda reducida a experimento imaginario, simulación mental o pensada.

Dichas afrentas se consideran consecuencia de la instrumentación y aplicación de la entrevista. En consecuencia, se tomaron decisiones para complementar este método (y se detallan en el siguiente capítulo): introducir experimento pensado de entrenamiento para preparar a los participantes a emitir locuciones espontáneas y no retrospectivas; afinar la narrativa de algunos EP con base en su historia científica; añadir entrevistas retrospectivas al final de cada experimento pensado para clarificar declaraciones y acciones mentales.

Con relación a las repercusiones empíricas, las entrevistas ayudaron a identificar acciones propias del proceso de experimentación pensada (esquemas 4.2 y 4.3). Las categorías se interpretaron como diversas expresiones de movilidad, de manera que se conjeturó la existencia de movilidad para verbalizar y explicitar las representaciones imaginadas, explicitar y verbalizar las restricciones de lo imaginado, movilidad propia del sopesar o reflexionar ideas, y movilidad ajustada a concluir el experimento pensado. Cada acción correspondiente a una parte del proceso experimental es un conjunto de ideas movilizadas con grados diversos de complejidad. Se llamó inicialmente parámetros a

estos conjuntos de ideas similares movilizadas como parte de la misma acción de experimentación pensada.

4.4 Parámetros de la movilidad de conocimientos

La etapa 2 ayudó a comprender la movilidad como objeto de investigación. Los siguientes parámetros ponen de manifiesto lo que se toma en cuenta como características de explicitar y verbalizar ideas durante acciones específicas de la experimentación pensada. Es decir, los parámetros de movilidad surgen de interpretar las frases que exteriorizan las acciones docentes al experimentar en el pensamiento; en consecuencia, estos parámetros son descripciones de las expresiones que indican acciones cognitivas propias de la experimentación pensada. Los parámetros no indican etapas consecutivas o progresivas, pueden ocurrir de manera simultánea y orden diverso conforme el experimentador verbaliza y externaliza pensamientos (en el capítulo 6 estos parámetros se interpretan con mayor claridad con relación a la pregunta de investigación de la tesis).

1. *Imaginar el escenario*. Conjunto de ideas enunciadas para describir el sistema físico. Se describen cuasi observaciones participantes (el experimentador es agente en el sistema físico representado internamente) o no participantes (el experimentador es solo un observador externo del sistema representado).
2. *Dominio de referencia*. La movilidad de conocimientos es el cambio de posición del conocimiento de un dominio a otro (Pozo 2001; 2011; 2017). Esto supone aceptar la narrativa del experimento pensado como estímulo para recuperar de la

memoria y verbalizar referentes (modelos teóricos ideales; imágenes; símbolos; leyes físicas; etc.) con diversos grados de similitud al sistema físico objeto de experimentación.

3. *Filtración y abstracción.* Desde los referentes recuperados se abstraen elementos representacionales análogos al sistema o fenómeno físico objeto de experimentación pensada, y externalizados por el experimentador a lo largo del proceso experimental. Queda por resolver cómo los profesores explicitan la potencial existencia de criterios para filtrar y abstraer elementos representacionales de los referentes.
4. *Relación de elementos representacionales.* Los elementos abstraídos desde los distintos referentes son organizados entre sí de acuerdo con el sistema físico objeto de experimentación pensada y las restricciones tácitas impuestas por los elementos referenciales. Ocurre por enunciados que restringen la situación en gran medida por vía tácita. Los enunciados van configurando un nuevo arreglo y disposición de elementos referentes y del fenómeno objeto de experimentación. Aparentemente el arreglo de conocimientos está en función de una variable o representación nuclear.
5. *Simulación mental o pensada.* El nuevo arreglo de conocimientos constituye un modelo mental de la situación narrada en el EP, tal que permiten al experimentador realizar cuasi observaciones de la situación física representada. Las verbalizaciones de las cuasi observaciones revelan a la conciencia del experimentador los elementos que constituyen su modelo. Expresar cuasi observaciones hace explícita información tácita recuperada de la memoria. Los enunciados pueden denotar una simulación mental o pensada según el tipo

de conjeturas o predicciones sobre los estados futuros del modelo.

6. *Reflexión o sopesar ideas.* La verbalización consciente de la observación del modelo que representa internamente el sistema físico (y en ocasiones representado externamente en formato icónico o lingüístico), conduce a los docentes a expresar dudas (cuestionamientos) sobre restricciones antes tácitas y a recuperar y anteponer otros elementos referenciales semejantes al modelo construido. Los nuevos enunciados plantean otros arreglos del modelo al buscar relaciones entre elementos relacionales diferentes o configurados de manera distinta.
7. *Exploración de ideas.* Si las verbalizaciones reflexivas plantean nuevas relaciones entre elementos representacionales, pero no se simulan, es decir, no se efectúan cuasi observaciones de estas sugerencias, el experimentador construye un experimento imaginario. En cambio, si esta nueva configuración es simulada, se predicen y exponen otros potenciales comportamientos del sistema físico representado.
8. *Relaciones causales.* Al exponer potenciales comportamientos de las nuevas relaciones o configuración del modelo, el participante expone relaciones causales entre variables y las reflexiona y sopesa a la luz de cuestionamientos, criterios explícitos de evaluación o contraposición de ideas.
9. *Conclusión.* El conjunto de oraciones emitidas para determinar en definitiva el comportamiento del sistema físico, ya sea como simulación mental o pensada, experimento imaginario o experimento pensado, constituyen la conclusión. En ocasiones son de carácter parcial y ligadas al momento de recuperar,

abstraer y enunciar elementos desde dominios de referencia. Las conclusiones parciales parecieran formularse en automático y vía tácita cuando el dominio de referencia y el fenómeno de experimentación objetivo son muy similares (por ejemplos los modelos en el experimento -EPSE1- de caída libre de Galileo), pero al verbalizarse se vuelven conscientes y objetos de reflexión conforme las condiciones del experimento objetivo.

Capítulo 5 Fase final del estudio

Resumen del capítulo

El propósito del capítulo es exponer las adecuaciones metodológicas realizadas con base en las implicaciones de los resultados en las etapas previas. Se presenta con más detalle el proceso de análisis, el cual comprende tres fases.

Los ajustes metodológicos consistieron en introducir un EP de entrenamiento al comienzo de la entrevista; refinar la narrativa de los EP; complementar el *think aloud* con una entrevista retrospectiva. Los participantes se seleccionaron conforme los criterios fijados en el capítulo anterior en la etapa 2.

El análisis de los reportes verbales es cualitativo y en fases semántica, cognitiva e interpretativa. La primera tiene por propósito reconstruir los modelos mentales movilizados con base en categorías prediseñadas. La cognitiva pretende identificar acciones mentales de la experimentación pensada con base en los datos para refinar las categorías de acciones mentales desarrolladas en el capítulo anterior. En la tercera fase se plantea interpretar los modelos y acciones mentales con la finalidad de continuar desarrollando los parámetros de movilidad de conocimientos.

7.1 Repertorio de experimentos pensados

Con la finalidad de mitigar declaraciones retrospectivas durante la entrevista *think aloud*, y obtener un reporte verbal confiable y mayor agencia de los docentes al experimentar en el pensamiento, se incluyó

un experimento pensado inicial de entrenamiento en el repertorio por utilizar en la entrevista. Dicho experimento es el número 2 de los aplicado en el taller o Etapa 1 del trabajo de tesis.

Para atenuar las dificultades al imaginar -representar internamente- las situaciones propuestas para experimentación pensada, se modificó la narración de dos de los experimentos pensados empleados en la segunda etapa del trabajo. Se procuró una narrativa simple con oraciones cortas y análoga a narrativas significativas en la historia de estos experimentos pensados.

La caída libre es el contenido central de los experimentos pensados (EP) empleados. Se seleccionaron dos clásicos estudiados en profundidad por Giambattista Benedetti (1530-1590) y Galileo Galilei (1564-1642). Estos experimentos pueden resultar familiares a los docentes, y el contenido para operarlos en el pensamiento son parte de los contenidos científicos que los participantes enseñan en el aula. Con ello se busca asegurar que la tarea de experimentación pensada no resulte compleja o desconocida, ni simple o memorística.

Los experimentos pensados en esta fase final del estudio se presentaron en el siguiente orden:

Experimento pensado 1

Lea en voz alta la siguiente narración de una situación imaginaria. Posteriormente inicie a trabajarla recordando emitir sus pensamientos en voz alta.

Una persona localizada en un polo terrestre comenzó a cavar un hoyo. Quería llegar hasta el extremo opuesto. Después de mucho

trabajo había logrado construir un túnel que atravesaba diametralmente la Tierra pasando por su centro. Al finalizar su obra, la persona admiró su ejemplar trabajo al observar a través de dicho conducto. Cautivado por la maravillosa longitud que atravesaba el planeta desde su posición hasta su antípoda, se le ocurrió dejar caer una manzana a través del túnel. Así, dejó caer la fruta y comenzó a observar lo que ocurría con el movimiento y peso de la manzana.

Imagine lo que la persona observaría. Luego, piense sobre ello y explique.

Experimento Pensado 2

Lea en voz alta la siguiente narración de una situación imaginaria. Posteriormente inicie a trabajarla recordando emitir sus pensamientos en voz alta.

Desde lo más alto de un campanario de una catedral, una altura algo mayor a 100 metros, el joven campanero disfrutaba de la vista. Dirigiendo la mirada hacia la base del campanario, recordó un viejo badajo de bronce que anteriormente hacía sonar la campana. Se le ocurrió que podría dejar caer el badajo y observar su caída. Pensó que sería más interesante comparar la caída del badajo de bronce con la caída de un proyectil de hierro que, según le habían dicho, era un proyectil de los utilizados durante la Revolución Mexicana.

El joven solicitó ayuda a un amigo para llevar a cabo lo que se le había ocurrido, pues el badajo tenía 10 veces la masa del proyectil. Entre ambos, y con bastantes dificultades, sacaron sus brazos desde lo alto del campanario, sosteniendo el badajo y el proyectil, para al mismo tiempo y desde la misma altura dejar caer los cuerpos dichos.

Instantes después el badajo y el proyectil se impactaron en el suelo. Los chicos se quedaron perplejos. No se dieron cuenta cuál de estos cuerpos había caído primero. Argumentando y contraargumentando alternadamente comenzaron a discutir sobre las propiedades del movimiento de caída de los dos cuerpos. De pronto, al campanero se le ocurrió lo siguiente: atar el proyectil al badajo y dejarlos caer.

De manera que, unidos el proyectil y el badajo, los dejaron caer desde la misma altura que habían soltado los objetos por separado y observaron lo ocurrido. Cuando este cuerpo, que llamaremos compuesto, tocó el suelo, el campanero y su amigo nuevamente discutían sobre la caída de los objetos.

Imagine lo que los jóvenes observarían. Luego, piense sobre ello y explique.

La aplicación de experimentos pensados en la fase final fue semejante a la Etapa 2. Sesiones individuales cuyo inicio partió por presentar a los profesores el propósito de investigación; explorar las nociones docentes sobre experimentación pensada; solicitar exponer en voz alta cada pensamiento; aclarar que se exhortaría a seguir hablando cuando hubiera silencios mayores a 3 segundos.

Antes de entregar uno a uno cada experimento pensado junto con papel y lápiz se trabajó con el EP de entrenamiento. Se solicitó leer y comenzar el *think aloud* del EP de ensayo; se resaltaron características de la entrevista y se aclararon dudas sobre la tarea a realizar. El ejercicio inicial finalizó con la instrucción: *podrías hacerme el favor de resumir y decir qué haremos el día de hoy.*

Los experimentos se trabajaron uno a la vez; al finalizar el *think aloud* correspondiente a cada EP se efectuó una entrevista retrospectiva (apartado 5.2). Las sesiones fueron audio grabadas con consentimiento oral de los participantes, tuvieron duración promedio de 1.5 horas y se transcribieron en su totalidad para generar reportes verbales (apartado 5.3). La entrevista finaliza con un cuestionario para recabar información sobre años de servicio docente, su familiaridad con los EP y su formación continua.

7.2 Entrevista retrospectiva

Las dificultades del estudio en la fase inicial ligadas con la instrumentación de la entrevista -flujo dispar entre pensamiento y locución verbal, constantes silencios e ideas incompletas, dudas respecto a cantidad y dominio de conocimiento de contenido docente- condujo a complementar el *think aloud* con una entrevista retrospectiva. Esta tiene por finalidad estudiar cómo piensan los individuos no sólo desde sus locuciones espontáneas, también desde las interacciones con el entrevistador; o sea, la entrevista retrospectiva genera evidencia para aclarar procesos o contenidos verbalizados previamente (Leighton, 2004).

La entrevista retrospectiva busca proporcionar al participante consciencia meta reflexiva sobre sus explicaciones orales con base en la ayuda brindada por el entrevistador. Otros beneficios para el investigador son, control sobre las interpretaciones construidas durante la entrevista, y oportunidad de reemitir el mensaje inicial al entrevistado para asegurarse que se está comprendiendo lo que hace y dice.

La Tabla 5.1 presenta la guía de preguntas para entrevista retrospectiva, elaborada tanto desde las necesidades y dificultades afrontadas en la etapa 2, como de consultar diferentes estrategias de entrevista semiestructurada empleadas para estudiar -en el contexto de tareas cognitivas- representaciones (Delval, 2001; Piaget, 1993), procesos de razonamiento (Leighton, 2017) y formación de conceptos (Aliberas *et al*, 2017; Gutiérrez, 1994; Vygotsky, 2010). Las estrategias de entrevista revisadas difieren en finalidades teóricas, no obstante, la guía se elaboró con finalidad instrumental y sin pretensión de resolver diferencias teóricas.

Las preguntas emergen al adoptar estrategias similares entre el método clínico crítico (Delval, 2001; Piaget, 1993), entrevista *teach back* (Aliberas *et al*, 2017; Gutiérrez, 1994) y doble estimulación (Vygotsky, 2010). Tales estrategias acogidas implican renunciar a preguntas categóricas y fijas; hacer contra sugerencias al final de la entrevista; formular preguntas básica y complementarias; evitar preguntas abstractas y del tipo *qué, cómo*; agrupar preguntas; repetir lo último dicho por el entrevistado en tono interrogatorio; formular preguntas alternadas para evitar sugerencias o inducción de respuestas; proporcionar instrucciones en términos de “*lo que tú piensas sobre el tema*”; poner a prueba la coherencia y consistencia de las explicaciones del entrevistado

(confrontar al participante con sus respuestas y recuperar lo que ha dicho); especificar acciones concretas (explica, describe, etc.).

Tabla 5.1 Guía de entrevista retrospectiva

Tipo de preguntas	Preguntas guía
Sobre el problema	Puedes decirme lo que éste experimento pensado está solicitando que pienses e imagines.
Sobre la conclusión	Me describes por favor detalladamente tu conclusión en este experimento pensado. ¿De qué manera llegaste a tu conclusión?
Sobre lo imaginado	Por favor describe detalladamente lo que imaginaste mientras ejecutabas el experimento pensado. Describe cómo imaginaste ____ Explica qué hizo que imaginaras ____
Sobre resistencia imaginativa	¿Cuándo señalas que la situación es sólo una suposición -difícil de creer o imaginar- qué significa o tratas de decir? ¿Por qué te parece poco creíble/difícil de imaginar _? Decías tener una inquietud o preguntarte _. Y tal inquietud ¿de qué manera la resolverías?
Sobre restricciones	Durante tu intervención aludiste a _. Por favor, explícame más al respecto. ¿Qué te llevó a pensar e imaginar todo lo que describes? Podrías explicar lo que tomaste en cuenta para imaginar lo que dijiste sobre _. Podrías platicarme alguna otra idea que hayas pensado o imaginado y no hayas manifestado. ¿Cuál es la razón por la que no la(s) mencionaste?
Evaluación del EP	¿Conocías el EP o una versión similar? ¿Lo podrías describir? ¿Dónde lo conociste / leíste? Podrías explicarme cómo te ayudó lo que imaginaste y pensaste para realizar el experimento pensado. Algo más que puedas decir sobre lo que pensaste con relación al tema del experimento pensado y sobre lo que imaginaste.
Sobre transformación	¿Hay alguna otra posible conclusión que se pudiera obtener?

	<p>¿Qué te llevó a concluir lo primero que dijiste y no _?</p> <p>La vez pasada un profesor me dijo "...". Cómo argumentarías a favor o en contra de esta idea</p> <p>¿De qué manera explicarías a ese profesor lo que tú estás pensando?</p> <p>¿Consideras que cambió algo en tu explicación ahorita con las preguntas que hago en relación con tu conclusión inicial?</p> <p>Podrías decirme algo más sobre lo que cambió en tu conclusión. Menciona qué te llevó a formular dichos cambios</p>
Sobre las notas	<p>Puedes decirme qué es para ti _</p> <p>¿Qué es lo que me habías dicho de_?</p> <p>Podrías explicar por qué dices _</p> <p>Podrías decirme algo más de _</p> <p>A qué te refieres con_</p> <p>Me podrías describir con más detalle _</p> <p>¿Qué hace que _? ¿Qué te hizo pensar _?</p> <p>Haré un resumen de lo que explicas para que me digas qué no estoy entendiendo</p>

Se formularon cuestiones agrupadas (conforme el tipo de preguntas) en 8 campos pensados de acuerdo con el tipo de procesos y contenidos implicados en la experimentación pensada (identificar un problema; imaginar un escenario; restringir lo imaginado; transformar la información; concluir; evaluar; y notas del entrevistador).

La guía se diseñó para ser flexible, por lo que a ningún participante se le plantearon todas las preguntas. La guía se estudió previo al trabajo empírico, de manera que durante el *think aloud* se tomaron notas sobre locuciones que captaron la atención del entrevistador, y la entrevista retrospectiva se realizó con base en dichas observaciones. Las notas se registraron siguiendo el formato de la guía, pero en lugar de preguntas se disponía de espacio para la escritura.

5.3 Reportes verbales

A través de la entrevista *think aloud* los docentes participantes expresaron sus pensamientos. El discurso se transcribió en su totalidad, y las afirmaciones se conciben como la evidencia empírica observable de lo no observable (acciones u operaciones de pensamiento y su contenido). Las alocuciones materializadas por escrito en reporte verbal son objeto de análisis. El reporte verbal se enriquece añadiendo las respuestas a la entrevista retrospectiva. Cada reporte verbal constituye la transcripción del *think aloud* y entrevista retrospectiva correspondiente a un solo experimento pensado realizado por un profesor.

La primera sugerencia para comenzar el análisis de reportes verbales es su reducción en unidades de información manejables (Chi, 1997; Corbin & Strauss, 2014; Leighton, 2017; Willis, 2015). Por lo regular se aceptan dos niveles para fragmentar el reporte verbal, segmentos y secciones de segmento (Corbin & Strauss, 2014; Leighton, 2017). El criterio para determinar el tamaño y cantidades de unidades de información de los segmentos y secciones está en función de las necesidades de cada trabajo.

Dado que el *think aloud* es un tipo de entrevista empleada para estudiar procesos de elaboración y solución de problemas, pareciera obvio segmentar y seccionar los reportes verbales con base en las estrategias y habilidades para llevar a cabo la tarea. Sin embargo, el trabajo de tesis busca comprender cómo los profesores de física en secundaria movilizan conocimientos en el contexto de la experimentación pensada, es decir, el propósito es reconstruir acciones para verbalizar ideas tácitas. Por tanto, el reporte verbal en el marco de esta

investigación se fragmentará no con base en las estrategias o habilidades para hacer una tarea cognitiva.

Determinar segmentos y secciones como unidades de información estará dada por la estructura de las entrevistas *think aloud* y retrospectiva. La transcripción correspondiente al *think aloud* es el principal segmento de estudio, mientras que el segmento retrospectivo es complementario.

El análisis de los reportes verbales procedió con base en seccionar cada segmento, empleando el *software* Atla.ti 8, en citas con proposiciones y oraciones enunciadas por los participantes. El seccionar con una granularidad tan fina genera enormes cantidades de citas, y aunque útil para precisar características de la movilidad, puede generar problemas interpretativos, por ello se toma un segmento como objeto de interés principal y el otro como complemento.

El siguiente capítulo presenta los resultados y discusión recurriendo a algunas de las citas. La Tabla 5.2 describe la simbología empleada en los reportes verbales, y patente en algunas citas.

Tabla 5.2 Simbología de transcripción de los reportes verbales

D	Docente
E	Entrevistador
<< frase >>	Comentarios sobre la transcripción
=...=	Solapamiento de intervenciones entre D y E
	Pausa de 1 segundo
	Pausa de 2 segundos
	Pausa de 3 segundos
(???)	Frases poco o nada claras
[...]	Idea incompleta

5.4 Características de los participantes

Los participantes en la etapa final del estudio se eligieron en conformidad con los tres criterios señalados en el capítulo 4 (antigüedad e ingreso al servicio profesional docente, formación inicial en escuela normal superior dentro del Plan de Estudios 1999).

En total se trabajó con 10 profesores de física en secundaria, todos normalistas, quienes realizaron 4 EP. Sin embargo, sólo se reporta el trabajo con tres docentes al realizar dos experimentos pensados. Las razones para presentar tres casos de participantes responde a las sugerencias de confiabilidad (Leighton, 2004; 2017) para entrevistas *think aloud* (descritas en el capítulo anterior): profesores que enuncian ideas completas (o lo menos incompletas posible); docentes con menor cantidad de silencios; participantes con verbalizaciones en presente y lo menos retrospectivas posibles, para asegurar la experimentación pensada como tarea de la memoria de trabajo y no como ejercicio para recuperar información de la memoria a largo plazo.

Los reportes verbales seleccionados conforme las sugerencias anteriores son más claros, concisos y estructurados. La decisión de emplear reportes verbales correspondientes a dos EP manifiesta la necesidad de emplear instrumentos de complejidad media; la familiaridad de los docentes con dos de los EP fue tal que reconocieron tener cierta familiaridad con los EP, sin por ello reducir sus acciones a enunciar y reproducir de memoria modelos teóricos ideales, y tampoco fue una tarea oscura en la que se vieran reducidos a no poder operar con ella. La familiaridad de los docentes con los EP se determinó por el cuestionario final (Tabla 5.2) y con la lectura rápida de los reportes verbales con la

que, *a priori*, se identificó los EP que propiciaron mayor movilidad de representaciones icónicas y teóricas.

Tabla 5.3 Características de los docentes

Características	Docente		
	A	B	C
Edad	27	30	28
Años de servicio	3	7	6
Formación continua	No	Maestría en educación	No
Familiaridad con los EP	EP1: Sí EP2: Sí	EP1: No EP2: Sí	EP1: Sí EP2: Sí

5.5 Análisis de los reportes verbales

El análisis de los reportes verbales se realiza de forma cualitativa y en tres fases siguiendo el enfoque de la teoría fundamentada para la construcción de categorías *bottom up* (Chi, 1997; Corbin & Strauss, 2014; Willis, 2015). La fase 1 y 2 se llevan a cabo por cada experimento pensado como instancia individual; la fase 3 es una comparación de familias de categorías y la comparación de todos los hallazgos previos.

La primera fase opera categorías prefijadas desde el enfoque naturalista de los experimentos pensados para describir los modelos mentales construidos por los docentes. La segunda fase busca generar categorías de análisis y sus propiedades por medio de representaciones gráficas y hacer una abstracción sintética de acciones inmersas al experimentar en el pensamiento. Visualizar gráficamente el proceso experimental permite capturar la complejidad del proceso experimental del pensamiento, y a la vez conjeturar un orden descriptivo y comprensivo.

La tercera fase propone descripciones interpretativas de cómo relacionar las acciones de experimentación pensada y los modelos contruidos y simulados, y así, desde la relación acción-concepto, tratar de comprender cómo se verbalizan ideas tácitas en el contexto de EP.

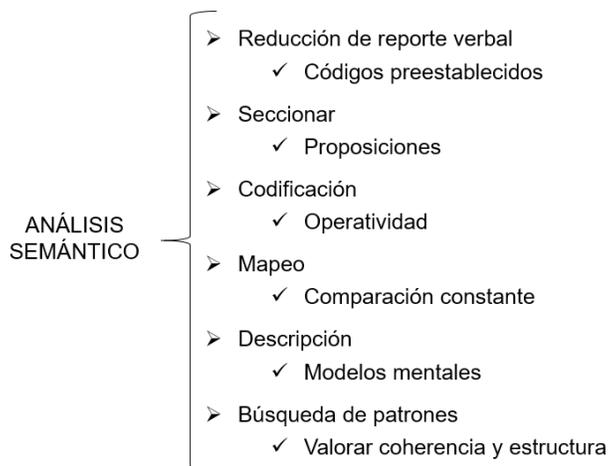
En la fase 1 del análisis se siguen empleando las categorías descritas en el apartado Resultados de la fase inicial en el capítulo 4: información proposicional, representación icónica, transformación de la información, entidades teóricas.

Para construir las categorías en la fase 2 se sigue el método básico en teoría fundamentada, comparación constante y formular preguntas. La comparación constante es tomar citas o secciones del reporte verbal y contrastarlos con otras citas o secciones tantas veces como sea posible; el resultado de comparar fragmentos arroja las propiedades de cada cita. Al comparar las citas se deben plantear preguntas reflexivas, por ejemplo: ¿qué dice?, ¿qué hace?, ¿qué significa esta palabra/oración en el contexto del reporte verbal? Las citas con propiedades semejantes se agrupan para conformar categorías.

La última fase al ser interpretativa no construye categorías de análisis, sino un sumario descriptivo para discutir los resultados anteriores y responder la pregunta de investigación. A continuación, se describen con mayor precisión los análisis en cada fase; los esquemas de las fases de análisis se elaboraron con base en la literatura (Chi, 1997; Corbin & Strauss, 2014).

Fase 1 (Esquema 5.1). Es un análisis semántico porque busca reducir el reporte verbal a ideas u oraciones. Estas ideas son seccionadas para encontrar las proposiciones de tipo teórico y representaciones de naturaleza icónica o modal con base en códigos o

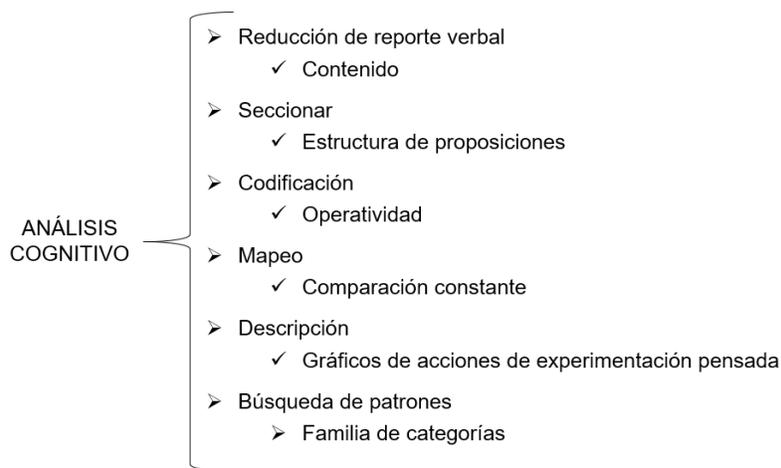
categorías preestablecidas (información proposicional, información icónica, transformación de la información, entidad teórica). Posteriormente se toman secciones más grandes del reporte verbal para dar operatividad a las categorías, es decir, las proposiciones codificadas se ponen en contextos amplios para evaluar su pertinencia a una categoría; líneas del reporte verbal alrededor de esas proposiciones deben justificar la interpretación dada a la proposición codificada. La comparación constante de proposiciones codificadas arroja características de tales proposiciones tal que se tienen más justificaciones para validar su pertenencia a una categoría. Valoradas y aceptadas las proposiciones como partes de una u otra categoría, se describen los modelos mentales construidos en la experimentación pensada. Finalmente, se busca en el reporte verbal alguna contradicción al modelo, las predicciones y simulaciones que hace, y con ello conocer su coherencia y estructura.



Esquema 5.1 Fase 1 del análisis

Fase 2 (Esquema 5.2). Consiste en un análisis cognitivo dado que los segmentos del contenido del reporte verbal se reducen a estudiar la estructura de la proposición. Empleando los segmentos de reporte verbal

se analiza la estructura proposicional para encontrar conectores, preposiciones y tiempos verbales que provean indicios sobre relaciones y acciones mentales que se efectúan con las proposiciones. Estas acciones se organizan en categorías construidas fundamentadas en los datos; dichas categorías se estudian mediante operatividad (puesta en el contexto del reporte verbal) y comparación constante para elaborar una representación gráfica del proceso de experimentación pensada. Al final se contrastan los diversos gráficos de categorías para encontrar las familias de categorías, o categorías equivalentes.



Esquema 5.2 Fase 2 del análisis

Fase 3 (Esquema 5.3). Es una interpretación de los modelos y acciones mentales producto del análisis previo de los reportes verbales. La finalidad es efectuar un sumario de reflexiones con fundamento en los datos para elaborar una taxonomía o parámetros de movilidad de conocimientos al experimentar en el pensamiento.



Esquema 5.3 Fase 3 del análisis

Capítulo 6 Resultados de la fase final e interpretación de los datos

Resumen del capítulo

El propósito del capítulo es doble: primero, reseñar los resultados de las entrevistas en términos de modelos mentales y acciones de los docentes al experimentar en el pensamiento; segundo, interpretar los modelos y acciones mentales para determinar cómo se movilizaron los conocimientos, asumiendo que hacer explícitas y verbalizar representaciones implica una relación acción-concepto, para refinar los parámetros de movilidad en el capítulo 4.

8.1 Fase 1. Modelos mentales movilizados

Cada reporte verbal correspondiente a un experimento pensado realizado en lo individual por los docentes se redujo en primera instancia en segmentos de acuerdo con el tipo de entrevista. En los segmentos transcritos del *think aloud* y retrospectivo se identificaron ideas y oraciones; en ellas se reconocieron secciones de locuciones representativas de las categorías prediseñadas. Con base en lo anterior, se elaboraron tablas de análisis para asignar citas de locuciones a cada categoría. La operatividad y comparación constante condujo a complementar las categorías asignando citas provenientes del segmento de entrevista retrospectiva en una segunda tabla de análisis. Con ayuda de estas se reconstruyen los modelos mentales de cada docente.

En este apartado se presentan solo los modelos mentales como resultado de segmentar y seccionar los reportes verbales. En el Anexo 1 y 3 hay ejemplos de los análisis llevados a cabo. Las tablas abajo (Tablas 6.1 y 6.2) ejemplifican parte del proceso para procesar los reportes

verbales. Los modelos de cada participante se presentan por separado siguiendo el orden de presentación de los EP durante las entrevistas.

a) Modelos mentales del docente A

La Tabla 6.1 contiene algunas citas asignadas a las categorías del enfoque naturalista de la experimentación pensada. Las citas corresponden al experimento pensado 1. La etiqueta denota el número de experimento pensado, docente y cita, mientras el segmento remite al momento de la entrevista en que fue verbalizada la cita. Por ejemplo, EP1DA1 remite a la cita 1 del participante A cuando ejecutó el primer experimento pensado durante el *think aloud*.

Tabla 6.1 Citas Docente A del segmento *think aloud*

Categoría	Cita	Etiqueta	Segmento
Información proposicional	cuando te estás moviendo en caída libre que sería el caso de la manzana puede aparentar que no tiene peso	EP1DA1	TA
	la parte central de la Tierra creo que se puede ¿cómo podría decirlo? manifestar un aspecto como de ausencia gravitacional	EP1DA2	
	del peso de la manzana podría hasta cierto punto despreciarse	EP1DA3	
Información icónica	hay un túnel	EP1DA4	TA
	la manzana va a estar atravesando el túnel de extremo a extremo	EP1DA5	
	la manzana va a estar cayendo	EP1DA6	
	en algún punto podría existir algún tipo de suspensión de la manzana	EP1DA7	
Transformación de información	no puede ser que se quede suspendida como tal <<la manzana>>	EP1DA8	TA

Entidades teóricas	la aceleración como consecuencia de la curvatura	EP1DA9	TA
	la aceleración es gravitacional	EP1DA10	

La Tabla 6.2 contiene algunas citas asignadas a las categorías para complementarlas desde la entrevista retrospectiva. Las etiquetas siguen aludiendo al número de experimento pensado de la entrevista, docente y número de cita; en el segmento, ER indica citas extraídas de la entrevista retrospectiva.

Categoría	Cita	Etiqueta	Segmento
Información proposicional	la manzana podría aparentar que no tiene peso	EP1DA1	ER
	la aceleración gravitacional en algún punto debe tender a cero	EP1DA2	
	la gravedad como tal no es una fuerza es una aceleración en este caso	EP1DA3	
Información icónica	imagínate que tengo un hiperboloide en el cual tú vas a sumergirte (???) arriba y abajo	EP1DA4	ER
	cuando la manzana esté aquí y se deje caer pues acá va a llegar a un punto aquí y cuando llegue acá pues básicamente volverá estar arriba pero en el otro punto	EP1DA5	
	Convencionalmente sé que eso no se puede hacer	EP1DA6	
	si tengo la Tierra aquí <<D indica un dibujo en su hoja de trabajo>> y está atravesada de polo a polo en algún punto se debe sentir esa curvatura es como por ejemplo cuando jugábamos canicas si yo tiraba la canica al hoyo	EP1DA7	
	como si estuviéramos jugando en una rampa	EP1DA8	
Transformación de información	por ejemplo la cuestión de un hiperboloide si yo dejara [...] imagínate que tengo un	EP1DA9	ER

	hiperboloide en el cual tú vas a sumergirte (???) arriba y abajo		
	aquí ocurriría algo porque estarías llegando al centro o al punto intermedio de la curvatura por decirlo	EP1DA10	
	sería como si estuviéramos jugando en una rampa como la manzana va a llevar la suficiente va a adquirir la suficiente energía para bajar estaría haciendo como este vaivén algo similar como una rampa	EP1DA11	
Entidades teóricas	la gravedad es una consecuencia de la curvatura	EP1DA12	ER
	la gravedad como tal no es una fuerza es una aceleración en este caso	EP1DA13	
	La curvatura debido a la presencia de la masa en el espacio	EP1DA14	

La reducción ayuda a identificar proposiciones y representaciones subyacentes a los modelos mentales. El caso ilustrativo ayudó a reconstruir el modelo mental de A en el contexto del EP1:

(1a) La manzana está en perpetua caída libre con aceleración constante por efecto del campo gravitacional generado por la curvatura del espacio.

Al modelo mental del EP1 del docente A (1a) subyace el principio de equivalencia entre gravedad y aceleración; la gravedad es producto del espacio curvado. Este modelo está ligado a otras representaciones icónica análogas para A (jugar canicas, a la rampa, imaginar el hiperboloide), situaciones que ejemplifican, argumentan y validan el modelo: gravedad y aceleración son equivalentes.

El modelo mental del segundo experimento pensado de A (Anexo 3) es semejante por ideas subyacentes:

(2a) Los cuerpos caen al mismo tiempo porque están en caída libre, tal que se desprecia la masa [peso] de los cuerpos.

El docente enuncia la caída libre de los cuerpos como producto de un campo gravitacional:

“su masa se desprecia por estar en una aceleración en un campo gravitacional” (EP2DA2-TA)

“la masa se desprecia es de que la caída es independiente de su masa” (EP2DA10-ER)

b) Modelos mentales del docente B

El primer modelo del docente B se sintetiza:

(1b) La caída libre está determinada por la atracción gravitacional que siempre influye en línea recta hacia abajo.

Esta concepción errónea de gravedad, común entre profesores y estudiantes (Kavanagh & Sneider, 2006a, 2006b), B la refuerza con base en la inercia:

“según la primera Ley de Newton dice que todos los objetos van a estar en movimiento rectilíneo uniforme hasta que llegue una fuerza e intervenga sobre él” (EP1B6-ER)

“¡Pues sí! va a llegar hasta donde la inercia le corresponda | yo creo que la manzana va a seguir así hasta que llegue otro objeto e interactúe con ella” (EP1B8-ER)

Para B, la manzana caería libremente y por inercia continuaría hasta interactuar con otro cuerpo. El modelo 1b expresa relación entre gravedad y objetos masivos para determinar la caída libre que se verbalizó en la entrevista correspondiente al segundo EP:

“los objetos van a caer igual y van a depender del peso de uno y otro porque va a influir la masa || ya que la atracción de gravedad va a ser la misma y al hacer el cuerpo compuesto va a ser la suma de los dos pesos para poder caer” (EP2DB7-ER)

Es decir, un cuerpo con mayor masa sentirá una fuerza gravitacional mayor, significa, interacción con mayor fuerza entre cuerpos; la atracción entendida como aceleración gravitacional que determina la velocidad de caída libre es constante de acuerdo con el modelo 1b:

“La aceleración sería igual | lo que modificaría sería la masa de los objetos y la fuerza con la que es atraída” (EP2DB8-ER)

Estas ideas expresadas en la entrevista retrospectiva del EP2 se subyacen al modelo 2 de B:

(2b) El tiempo de caída libre de un móvil está determinada por la gravedad y no por su masa, la cual ejerce influencia sobre el peso del cuerpo (fuerza de atracción con que es atraído por la Tierra)

Modelo desde el cual B hace inferencias sobre la igualdad entre las relaciones mayor masa/mayor fuerza de atracción y menor masa/menor fuerza de atracción:

“el que tenga mayor masa va a tener mayor atracción hacia el centro de la Tierra y el que tenga menor masa va a tener menos atracción a la Tierra” (EP2DB3-TA)

“los dos materiales que no permiten que interfiera el aire consideraría que la caída es recta y que van a llegar igual” (EP2DB5_TA)

b) Modelos mentales del docente C

El modelo 1c del tercer participante se reconstruyó en los siguientes términos:

(1c) el centro de la Tierra es el centro gravitacional al que tienden moverse los cuerpos en caída

Las ideas subyacentes al modelo refieren un orden producto de un centro gravitacional en todos los cuerpos:

“todos los objetos poseemos || una fuerza gravitatoria” (EP1DC7-ER)

“esa atracción gravitatoria o gravitacional hace que estén suspendidos en el aire y no se muevan | no caigan o no suban” (EP1DC8-ER)

En el segundo EP, C externaliza dos modelos antagonistas:

(2c) El tiempo de caída libre de un cuerpo está en función de su masa

(2c') El tiempo de caída de un móvil es independientes de su masa y está en función de variables que interactúan con la masa (resistencia del medio, forma del móvil, gravedad)

El modelo 2c' lo describe como el caso escolar, y para el participante carece de certeza:

“cuando tú estás en la secundaria con tus alumnos y estás tratando el tema de la caída libre | pues tú les estás tratando de explicar de que si existiera el vacío | si existiera un espacio completamente vacío donde no intervinieran el aire | ni la fuerza de gravedad | etcétera | los objetos | independientemente de su masa caerían exactamente al mismo tiempo | yo tengo que convencerlos de que eso ocurriría | pero yo maestra no estoy convencida | ese es mi problema | que yo maestra no estoy totalmente convencida de que eso ocurra porque nunca he visto una cámara de vacío” (EP2DC11-ER9

8.2 Fase 2. Acciones identificadas al experimentar en el pensamiento

La fase de análisis para reconstruir las acciones al experimentar en el pensamiento se realizó con ayuda del *software* Atlas.ti 8. Las ideas identificadas en los segmentos de entrevista se seccionaron conforme proposiciones relativas a acciones cognitivas semejantes. Los reportes verbales se leyeron señalando verbos y sus tiempos, expresiones, relaciones, hechos, referentes que indicaran semejanza entre citas en las cuales se identificaban indicios de acciones mentales. Por ejemplo,

sintetizando, en el caso del EP1DB las siguientes citas se agruparon en la categoría Sopesar o Reflexionar:

“que <<la manzana>> pueda bajar y luego pueda subir porque ¿o sea quién aplicaría la fuerza de tal manera que pueda subir?” (EP1DB14-ER)

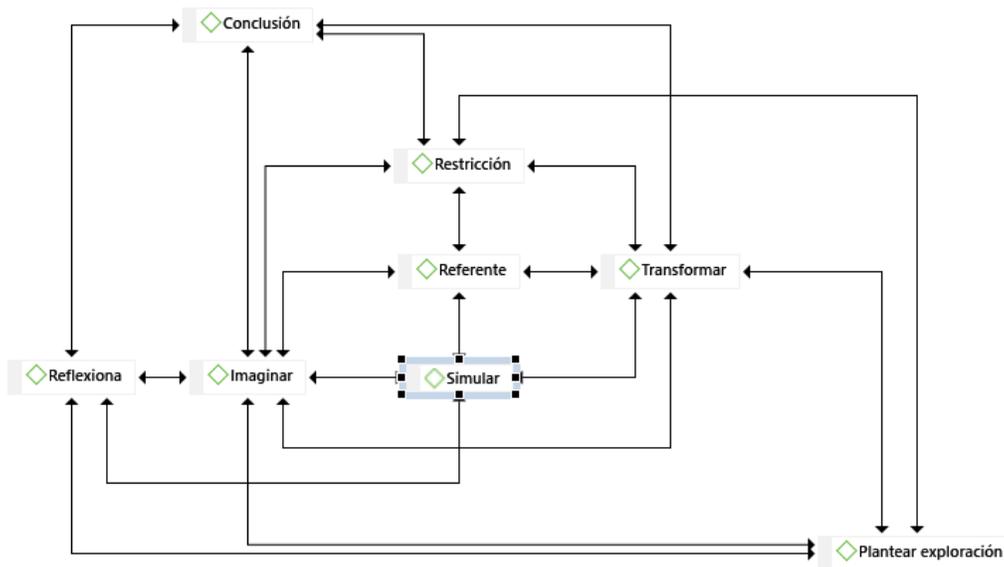
“Entonces si está aquí || ¿a dónde llegaría la manzana?” (EP1DB16-ER)

Las dos citas plantean cuestionamientos en indicativo del pospretérito. Las preguntas son empleadas por B para estimular el flujo de más pensamiento posteriormente verbalizados.

Las citas agrupadas en categorías dadas sus propiedades fueron trabajadas en operatividad y comparación constante (Esquema 5.2), y con ello se elaboraron los gráficos de las acciones de experimentación pensada por cada participante. Se presentan por separado las acciones realizadas por cada docente al experimentar con los dos EP.

a) Acciones mentales de A

En el Esquema 6.1 se aprecia las acciones mentales de A al experimentar en el pensamiento.



Esquema 6.1 Acciones mentales EP2 Docente A

En la Ilustración 6.1 se encuentran las propiedades del esquema anterior. El enraizamiento indica el número de enunciados asignados a dicha categoría. La densidad cuenta las relaciones de una categoría. Por ejemplo, Reflexionar es una acción de A poco verbalizada (2 enunciados), pero estos enunciados a su vez están ligados con proposiciones que corresponden a 4 acciones mentales más: imaginar, simular, explorar y concluir.

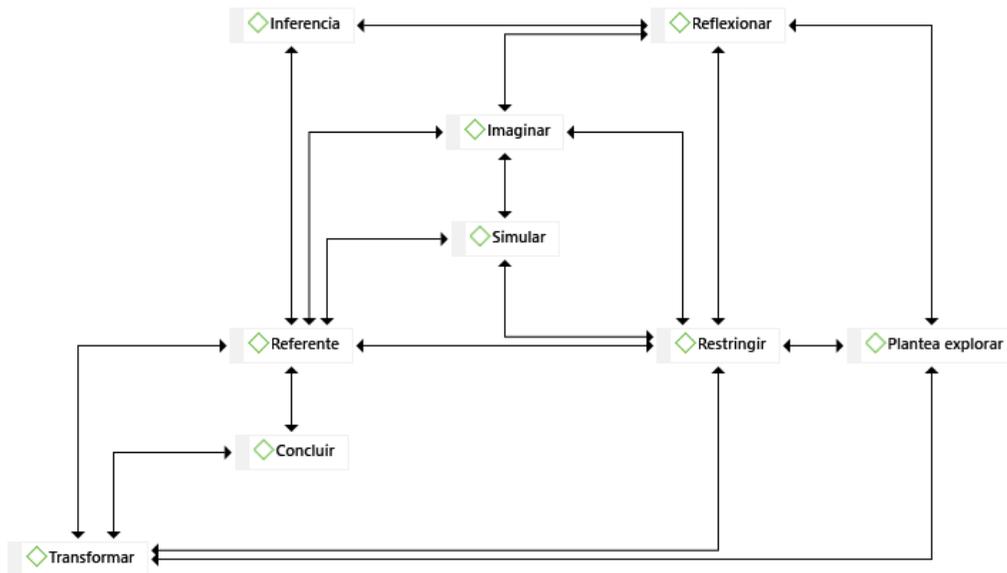
Nombre	Enraizamiento	Densidad
◇ Conclusión	6	4
◇ Imaginar	12	7
◇ Plantear exploración	2	4
◇ Referente	6	4
◇ Reflexiona	2	4
◇ Restricción	10	5
◇ Simular	7	4
◇ Transformar	9	6

Ilustración 6.1 Propiedades de las acciones mentales EP2DA

La complejidad de experimentar en el pensamiento se refleja en el esquema, y la ilustración añade información relevante para identificar la inclinación del profesor por locuciones que describen sus representaciones imaginarias, restringir escenarios, transformarlos y simularlos. Para A, imaginar está ligado a todos los procesos de experimentación pensada. En cambio, pocas expresiones las dedica a reflexionar sus ideas o plantear exploraciones mediante expresiones que cuestionan las diferentes configuraciones o diferentes arreglos experimentales producto de transformar y simular los escenarios.

b) Acciones mentales de B

El Esquema 6.2 representa las acciones de B con el EP1. Las acciones nucleares en este proceso de experimentación son declaraciones para explicitar referentes y restringir la situación, así mismo son categorías con más cantidad de citas asociadas (Ilustración 6.2). Este participante se muestra menos propenso a imaginar y simular el modelo. Efectúa una inferencia derivada de explicitar un referente como parte de una acción reflexiva.

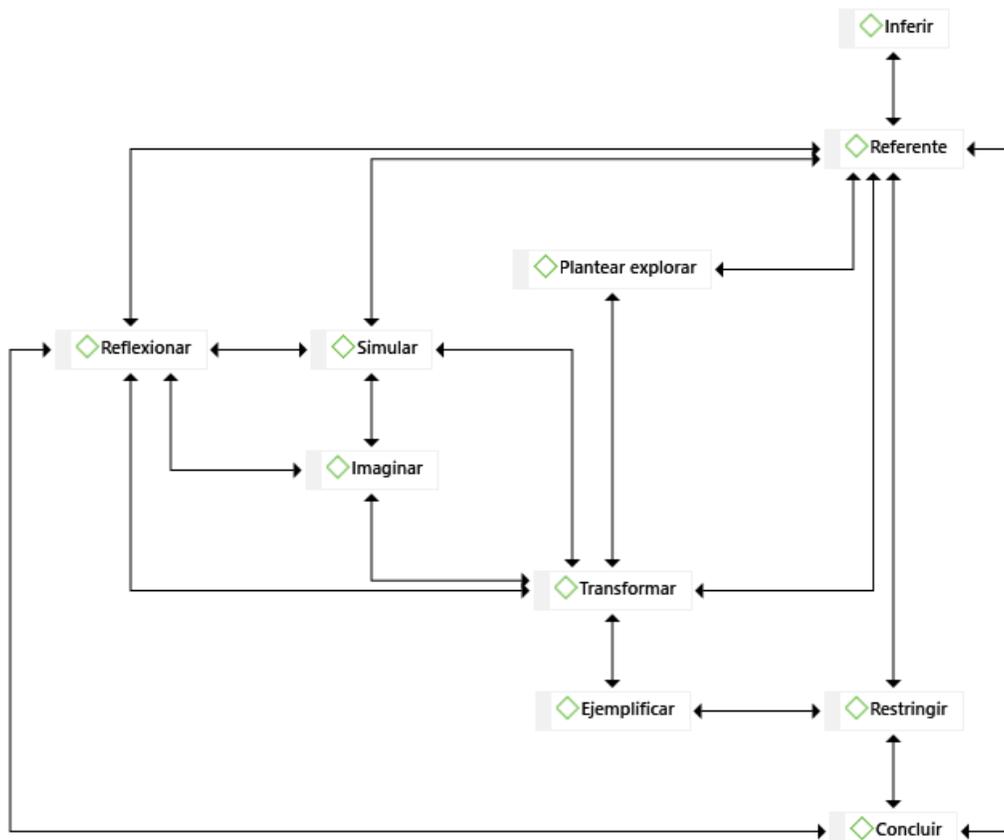


Esquema 6.2 Acciones mentales EP1 Docente B

○	◇ Concluir	■	3	■	2
○	◇ Imaginar	■	4	■	4
○	◇ Inferencia	■	1	■	2
○	◇ Plantea explorar	■	2	■	3
○	◇ Referente	■	5	■	6
○	◇ Reflexionar	■	4	■	4
○	◇ Restringir	■	8	■	6
○	◇ Simular	■	2	■	3
○	◇ Transformar	■	3	■	4

Ilustración 2 Propiedades de las acciones mentales EP1DB

El caso B se puede interpretar como un participante que toma los EP más como instrumentos para interpretar Referentes con los cuales transformar la situación y reflexionar y cuestionar en torno a ello (Esquema 6.3). Y se reafirma con poca inclinación a imaginar y simular un modelo.



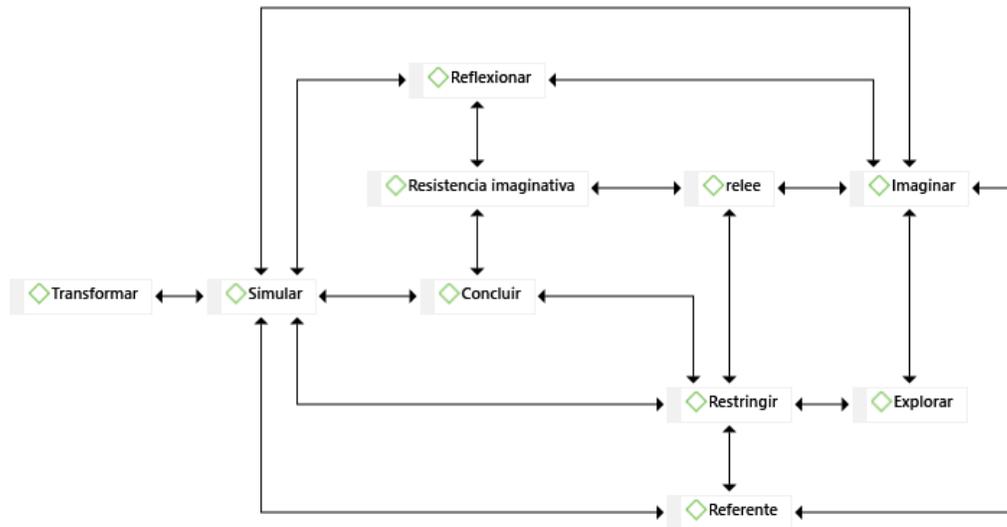
Esquema 6.3 Acciones mentales EP2 Docente B

○	◇ Concluir	■	2	■	3
○	◇ Ejemplificar	■	2	■	2
○	◇ Imaginar	■	2	■	3
○	◇ Inferir	■	1	■	1
○	◇ Plantear explorar	■	1	■	2
○	◇ Referente	■	8	■	7
○	◇ Reflexionar	■	4	■	5
○	◇ Restringir	■	4	■	3
○	◇ Simular	■	2	■	4
○	◇ Transformar	■	5	■	6

Ilustración 3 Propiedades de acciones mentales EP2B

c) Acciones mentales de C

El EP1 fue realizado por C principalmente a través de acciones ligadas para simular, imaginar y restringir el escenario. La mayor parte de sus alocuciones se asignan a imaginar y simular la situación.



6.3 Fase 3. Interpretación de los reportes verbales

Las narraciones de los EP ejecutados por los profesores permite identificar que en cada experimentación pensada los profesores operan con un constituyente material central y un constituyente teórico central. Las operaciones que efectúan con tales constituyentes permiten visualizar que a los docentes les faltó involucrarse activamente en la ejecución de los experimentos pensados. Por ejemplo, A representó un fenómeno de caída vertical de una manzana por un túnel que atraviesa la Tierra por su centro, de manera que cae la manzana y luego sube; al final menciona que la manzana se detendría y no saldría por el túnel, pero no se involucró en explorar en que si la gravedad detiene la

manzana cuando sube por el túnel, también por efecto de la gravedad debería caer. En este caso, 'A' efectuó una simulación mental (Özdemir, 2009), es decir, sus procesos cognitivos le permitieron representar en la mente un fenómeno físico imaginario.

La docente 'B' en cambio identificó ideas que podrían haber tenido efectos en el escenario imaginado de haberlas explorado, por ejemplo cuando habló de la densidad como probable constituyente teórico que modificara el peso de la manzana. Sin embargo tampoco se involucró en pensar los efectos de esa idea en su escenario. En este caso, 'B' efectuó un experimento imaginado (Brown, 1986), es decir, identificó una observación experimental (Brown, 1986), una idea que podría afectar el fenómeno imaginado pero que no se exploró. Igual ocurrió con 'C', quien no se involucró activamente con el EP al definir que era arriba y abajo, de manera que sólo identificó la idea pero no la llevó a cabo, no la pensó, por tanto realizó un experimento imaginario.

Al decir que los profesores no se involucraron de manera activa con el EP trato de decir que no realizaron una experimentación pensada, que no trataron de hacer tal experimentación pensada. La experimentación pensada consiste en representar un fenómeno físico en la mente, explorarlo, su esencia es el pensamiento. Se trata de explorar secuencias de eventos. En cambio los profesores se quedaron en representar en la mente el fenómeno que se narraba.

Es muy probable que la experimentación pensada no se efectuara porque los profesores trabajaron con sus esquemas de conocimientos consolidados. Por ejemplo, en el caso B se intuye un vínculo entre la densidad terrestre y el peso de la manzana, de manera que el peso de la fruta pueda modificarse en los polos terrestres, pues asume que la

densidad en los polos es diferente a la densidad terrestre en el centro del planeta; pero al tener un esquema de conocimiento consolidado al respecto detiene su acción con un “no sé” y retoma un esquema de conocimiento consolidado: la gravedad y su relación con el peso. Así, para la profesora la manzana mantiene su peso igual durante su paso por el túnel porque la gravedad de la Tierra es la misma, quedando sin explorar su intuición conceptual.

Lo anterior también sugiere que quizá los profesores sin ayuda o estímulos externos no van a ejecutar experimentos pensados mientras superen las situaciones narradas con sus conocimientos consolidados. De allí que como entrevistador hay que asumir un rol más activo y hacer preguntas ‘estratégicas’ que conduzcan a los docentes a explorar sus ideas. Por ejemplo, haber invitado a B a explicar los efectos de la densidad terrestre en el cambio de peso de la manzana. Es decir, hacer preguntas que lleven a los docentes a no detener su pensamiento cuando visualicen ideas que no son parte de sus conocimientos consolidados. Esas preguntas ‘estratégicas’ deben tener como finalidad explorar lo que los docentes saben sobre las intuiciones y proposiciones que están expresando.

6.4 Movilidad de conocimientos

Las acciones de los participantes al experimentar en el pensamiento están configuradas por sus locuciones verbales. Interpretar estas locuciones, para entender su secuencia y estructura, proporciona características para conjeturar cómo las representaciones internas se exteriorizan. Esta conjetura constituye la movilidad del conocimiento en el contexto de la experimentación pensada (Esquema 6.4).



Esquema 6.4 Modelo de movilidad de conocimientos

El esquema 6.4 es el modelo de movilidad de conocimientos que se conjetura para tratar de comprender algunas de las estrategias empleadas por los docentes para verbalizar sus ideas tácitas. Se describen por separado con base en las propiedades de las acciones mentales para experimentar en el pensamiento.

Los dominios no indican etapas consecutivas que se experimentan al movilizar conocimientos, pueden ocurrir de manera simultánea y orden diverso. Estos dominios son los parámetros desarrollados en el capítulo 4 refinados conforme la fase final de la investigación.

- Dominio de referencia. El primer parámetro de la movilidad de conocimientos es el cambio de posición del conocimiento. ¿Qué significa cambio de posición del conocimiento? La idea implícita detrás por aceptar es que el conocimiento está en un lugar y es llevado a otro; dicho lugar debe entenderse como la posición ocupada por un conocimiento concreto dentro de un sistema de representaciones de conocimientos, tal que puedan ser:

conceptos, esquemas, modelos teóricos, símbolos, imágenes o leyes físicas. Durante la experimentación pensada se movilizan diversos conocimientos provenientes de distintitos referentes recuperados por la memoria; lo que motiva recuperar ciertos conocimientos de referencia es la situación narrada del experimento pensado (EP) que plantea una situación para la cual deben determinarse las condiciones ideales y abstracciones necesarias para que ocurra o que expliquen por qué está ocurriendo.

- Filtración y abstracción desde el dominio. Luego desde los conocimientos de referencia se abstraen los elementos representacionales que el agente considere indispensables para establecer las condiciones de abstracción e ideales de la situación narrada en el EP. Aquí tenemos el segundo parámetro de la movilidad: el filtro de conocimientos para abstraer la información que el agente considera necesaria. Queda por resolver si es posible hacer explícitos algunos de los criterios empleados por los agentes durante este proceso de 'filtración'.
- Relación de elementos de conocimientos. Posteriormente los conocimientos abstraídos desde los distintos referentes son organizados entre sí de manera tácita siguiendo la situación narrada así como por las restricciones propias de los conocimientos empleados. Las relaciones y organización de los conocimientos que establece el agente pueden ser las propias establecidas por principios y leyes físicas u otros conocimientos referenciales, así como por procesos intuitivos poco claros. El arreglo de conocimientos constituye así el establecer la nueva posición que ocuparán

los elementos de conocimientos que se han abstraído desde los referentes. Llegados a este punto tenemos el tercer parámetro de la movilidad. Aparentemente el arreglo de conocimientos está en función de un término o representación nuclear, así, es recomendable analizar cuáles son los criterios implícitos que guían el arreglo de conocimientos.

- Simulación mental o pensada. El nuevo 'arreglo' de conocimientos constituye un modelo mental de la situación narrada en el EP, tal que explica las condiciones ideales y abstracciones que subyacen a la situación física representada en el 'laboratorio de la mente' que explican por qué podría ocurrir o está ocurriendo. Es entonces cuando aparece el cuarto parámetro: la simulación del EP para denotar una posible consecuencia de las relaciones establecidas entre los conocimientos. Aquí ocurre que el experimentador haga explícita la información tácita recuperada de la memoria, o conjeture intuiciones 'teóricas' o perceptuales.
- Evaluación del modelo mental y experimento imaginario. Hasta aquí la movilidad de conocimientos puede calificarse como simulación mental o simulación pensada, y puede ser que el agente considere su actividad finalizada. Sin embargo, puede ocurrir que el agente evalúe su consecuencia de manera tácita, que dude de ella a partir de criterios específicos (quinto parámetro de la movilidad de conocimientos), y entonces explorar otras posibles consecuencias derivadas del arreglo de conocimientos determinado, dando por finalizada su intervención mental,

o por otro lado, evaluar las distintas consecuencias y decretar una conclusión. El quinto parámetro, evaluación o escepticismo del modelo mental construido, puede llevar al agente a plantear nuevas relaciones entre los conocimientos empleados, introducir nuevos conocimientos, nuevas referencias. Si el experimentador no simula en el laboratorio de la mente estas nuevas posibles relaciones, la movilidad de conocimientos hasta aquí efectuada se califica de experimento imaginario.

- Experimento en el pensamiento. En cambio, si se ejecuta la simulación mental, es decir, se explora una o varias posibles consecuencias del nuevo arreglo de conocimientos, lo que constituye el sexto parámetro de la movilidad, se podrá decir que el agente ha efectuado un experimento en el pensamiento. De allí puede ocurrir que el experimentador determine una consecuencia y finalice su intervención o
- Evaluación. evalúe su consecuencia o consecuencias para determinar una conclusión.

Capítulo 7. Conclusiones

El presente apartado no discutirá más los resultados; en cambio se presenta una lista de ideas que se han ido reflexionando y que emergieron de los datos postulándose para ser discutidas y analizadas con mayor detenimiento en futuras investigaciones, dado que aquí hay elementos sueltos para abordarlas. Estas ideas así mismo marcan los alcances explicativos de la presente investigación.

1. El tipo de referentes que aparecen son propios de la enseñanza y medios de comunicación.
2. Se sugiere que los docentes no experimentan en el pensamiento y sí están llevando a cabo simulaciones pensadas y simulaciones mentales.
3. La aparente ejecución de la simulación mental consiste en: establecer el escenario con base en abstraer constituyentes específicos de la narración original del EP y deducir una conclusión seguida de su justificación.
4. En los EP's se mencionan componentes teóricos relevantes para los escenarios pensados, pero no se opera con ellos explorando distintas posibilidades.
5. En los EP's se asocian de manera errónea componentes teóricos.

En cada experimento pensado los docentes emplean un concepto 'nuclear' o 'central' con el cual operan, de manera que tal conocimiento podría considerarse el 'móvil' en torno al cual se mueven y conectan otros conocimientos para ejecutar un experimento pensado.

El estudio de las transcripciones de los reportes verbales arroja dos reflexiones generales para finalizar el trabajo. La primera de ellas entrevé poca implicación y participación en la realización de los experimentos pensados (EP). Es decir, hay poca movilidad de conocimientos pues no se exploran diferentes posibilidades teóricas de los escenarios imaginarios; en otras palabras, no se exploran consecuencias conceptuales derivadas de operar con un concepto o principio físico más allá de las que literalmente se narran en los EP's. Igualmente se percibe poca disposición a introducir y transformar los constituyentes de los escenarios imaginarios o el escenario mismo y explorar otras posibles consecuencias físicas.

Los docentes de física construyen los escenarios imaginarios con los constituyentes materiales mencionados en los EP's, para luego deducir las consecuencias del escenario que se propone en las narraciones. Se percibe que no necesariamente establecen relaciones causales entre los constituyentes materiales para deducir cómo deberían comportarse y experimentar diferentes posibilidades del escenario imaginado. En cambio, enuncian los conocimientos que poseen sobre los fenómenos físicos que están representados en el escenario imaginado.

En general un docente no explora la idea de cómo la gravedad terrestre interactúa con la manzana cuando ésta cae por el túnel. No explora la agencia de la gravedad en el escenario imaginado. La gravedad atraería nuevamente la manzana al centro de la Tierra haciéndola oscilar hasta llegar a un punto de equilibrio en el cual la manzana se detendría en el centro de gravedad terrestre. Tampoco explora otras alternativas para poner a prueba lo que recuerda del video, tal como imaginar que la manzana no cae por el túnel, sino que es lanzada, o por ejemplo que en lugar de un túnel la Tierra se dividió en

dos partes iguales y está separada exactamente por el espacio necesario para que pase una manzana.

Se aprecia una falta de implicar el pensamiento en modificar escenarios y poder diferenciar entre aventar la manzana o el simplemente dejarla caer.

La segunda reflexión general es producto de la anterior. Al identificar poca implicación de los docentes con la realización de los EP lleva a ver que en realidad no hubo experimentación pensada en sentido estricto, sino simulaciones mentales en las que se representaron fenómenos físicos imaginarios.

Un experimento pensado se caracteriza por ser una actividad cognitiva en la que se construye un modelo mental para explicar una situación, plantear o resolver un problema; su esencia es el pensamiento, de manera que mediante procesos de razonamiento se exploren secuencias de evento imaginados. En este caso, los profesores no implican su pensamiento en explorar sus ideas, sólo las enuncian para representar el escenario que se describe y aventurar una posible consecuencia sin evaluarla, sin operar con ella.

Referencias bibliográficas

- Acar, H. & Gürel, Z., (2014). "Reflection of High School and Physics Education Students' Views about Satellite Motion into Their Thought Experiments". *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi [Hacettepe University Journal of Education]*, 29(2), 01-15.
- Acar, H. & Gürel, Z., (2015). "Students' Thought Experimental Reasonings on an Imaginary Solar System". *Balkan Physics Letters*, 23, 94-102. Obtenido de <http://bpl.balkanphysicalunion.com/index.php?content=vol23>
- Asikainen, M. A. & Hirvonen, P. E., (2014). "Probing Pre- and In-service Physics Teachers' Knowledge Using the Double-Slit Thought Experiment". *Science & Education*, 23(9), 1811-1833. doi:10.1007/s11191-014-9710-1
- Bachelard, G. (1934/1985). *El nuevo espíritu científico* (2da edición en español ed.). (R. Sánchez, Trad.) México: Editorial Nueva Imagen.
- Bachelard, G. (1940/2009). *La filosofía del no. Ensayo de una filosofía del nuevo espíritu científico* (2a ed ed.). (N. F. Labruno, Trad.) Buenos Aires, Argentina: Amorrortu.
- Bachelard, G. (1972/2009). *El compromiso racionalista*. (J. Tula, Ed., & H. Beccacece, Trad.) D.F., México: Siglo XXI Editores.
- Berger, P. Luckman, T. (1967/2008). *La construcción social de la realidad*. (S. Zuleta, Trad.) Buenos Aires, Argentina: Amorrortu Editores
- Bloor, D. (1971/2003). *Conocimiento e imaginario social* (1ra, 2da reimpresión ed.). (E. L. Blanco, Trad.) Barcelona, España: Gedisa.

- Blown, E. J. & Bryce, T. G. K., (2013). "Thought-Experiments About Gravity in the History of Science and in Research into Children's Thinking". *Science & Education*, 22(3), 419-481. doi:10.1007/s11191-012-9548-3
- Brown, J. R. (1986). "Thought experiments since the scientific revolution". *International Studies in the Philosophy of Science*, 1(1), 1-15. doi:10.1080/02698598608573279
- Brown, J. R. (1991/2005). *The laboratory of the mind. Thought experiments in the natural sciences*. New York: Routledge.
- Caamaño, A. (2003/2012). "Los trabajos prácticos en ciencias". En M. P. Aleixandre, *Enseñar ciencias* (págs. 95-118). México: Editorial Graó/Colofón.
- Candela M., M. A. (1990/2001). Cómo se aprende y se puede enseñar ciencias naturales. En M. T. Noemí García García, *La enseñanza de las ciencias naturales en la escuela primaria. Lecturas* (págs. 19-32). D.F., México: Dirección General de Materiales y Métodos Educativos de la Subsecretaría de Educación Básica y Normal-SEP
- Chalmers, A. (1990/2006). "Experimentación". En *La ciencia y cómo se elabora* (E. P. Sedeño, Trad., págs. 78-102). México: Siglo XXI Editores.
- Chalmers, A. (2001). "Maxwell, mechanism and the nature of electricity". *Physics in Perspective*, 3(4), 425-438. doi:10.1007/PL00000539
- Clement, J. (1994). "Imagistic simulation and physical intuition in expert problem solving". En L. E. N.J. (Ed.), *Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*.

- Clement, J. (2003). "Imagistic Simulation in Scientific Model Construction". *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Obtenido de http://works.bepress.com/john_clement/10/
- Couso, D. I., Izquierdo, M. & Merino Rubilar, C., (2008). "La resolución de problemas". En A. G.-B. Cristian Merino Rubilar, *Áreas y estrategias de investigación en la didáctica de las ciencias experimentales* (págs. 38-50). España: Universitat Auntonoma de Barcelona.
- Deng, Z. (2001). "The distinction between key ideas in teaching school physics and key ideas in the discipline of physics". *Science Education*, 85(3), 263-278. doi:10.1002/sce.1009
- Dewey, J. (1910/1993). En *Cómo pensamos. Nueva exposición de la relación entre pensamiento y proceso educativo* (M. A. Galmarini, Trad.). Barcelona: Editorial Paidós.
- Driver, R. Guesne, E. & Tiberghien, A. (1985/1989). "Algunas características de las ideas de los niños y sus implicaciones en la enseñanza". En *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia* (P. Manzano, Trad., págs. 291-304). Madrid, España: Ediciones Morata.
- Feynman, R. P. (1963/1998). *Física. Volumen 1: Mecánica, radiación y calor*, D.F. México: Addison Wesley
- Flores, F. Lopez, A. Gallegos, L. & Barojas, J. (2000). "Transforming science and learning concepts of physics teacher". *International Journal of Science Education*, 22(2), 197-208. doi:10.1080/095006900289958

- Flores-Camacho, F. G.-C. (2007a). "Perfiles y orígenes de las concepciones de ciencia de los profesores mexicanos de química". *Perfiles Educativos*, 29(116), 60-84.
- Flores-Camacho, F. G.-C. (2007b). "Concepciones sobre la naturaleza de la ciencia de los profesores de biología del nivel secundario". *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 12(32), 359-380.
- Flores-Camacho, F. G.-C.-F.-M.-R. (2007c). "El conocimiento de los profesores de ciencias naturales de secundaria: un estudio en tres niveles". (I. C. Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, Ed.) *Revista Iberoamericana de Educación*, 43(3), 1-19. Obtenido de <http://rieoei.org/1800.htm>
- Gilbert, J. & Reiner, M. (2000). "Thought experiments in science education: potential and current realization". *International Journal of Science Education*, 22(3), 265-283. doi:10.1080/095006900289877
- Gooding, D. & Addis, T. R. (2008). "Modelling experiment as mediating models". *Foundations of Science*, 13(1), 17-35. doi:10.1007/s10699-007-9114-7
- Gooding, D. (1985/1989). " 'In nature's school: Faraday as an experimentalist". En D. G. (Eds), *Faraday rediscovered. Essays on the life and work of Michael Faraday, 1791-1867*" (págs. 105-136). England: The Macmillan Press.
- Gooding, D. Pinch T, Schaffer, S. (1989). "Preface" and "Introduction". En D. P. Gooding, *The uses of experiment. Studies in the natural sciences* (págs. XIII-XVII and 1-27). Great Britain: Cambridge University Press.

- Guerra Ramos, M. T. (2011). ¿Qué se necesita para enseñar ciencias? En UPN/SEP, *Las ciencias naturales en educación básica: formación de ciudadanía para el siglo XXI* (págs. 129-157). D.F., México: SEP
- Gutiérrez, R. (1996). "Modelos mentales y concepciones espontáneas". *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*(7), 73-86.
- Gutiérrez, R. & Ogborn, J. (1992). "A causal framework for analysing alternative conceptions". *International Journal of Science Education*, 14(2), 201-220. doi:10.1080/0950069920140208
- Gutiérrez, R. y. Pinto, R. (2005). "Relaciones entre simulaciones y modelos. Análisis de simulaciones científicas didácticas". *Enseñanza de las ciencias*(Número Extra. VII Congreso).
- Harlen, W. (1998). *Enseñanza y aprendizaje de las ciencias*. Madrid, España: Morata
- Helm, H. Gilbert, J. Watts, D. M. (1985). "Thoughts experiments and physics education - part 2". *Physics Education*, 20, 211-217.
- Holton, G. (1985). "Introducción". En *La imaginación científica* (J. J. Utrilla, Trad., págs. 7-18). D.F., México: Fondo de Cultura Económica / CONACYT.
- Klassen, S. (2006). "The science thought experiment: How it might it be used profitably in the classroom?". *Interchange*, 37(1), 77-96. doi:10.1007/s10780-006-8401-
- Köse, D. Ş. & Özdemir O. F. (2014). "The nature and role of thought experiments in solving conceptual physics problems". *Science & Education*, 23(4), 865-895. doi:10.1007/s11191-013-9635-0

- Kuhn, T. S. (1977/1993). "La función de los experimentos imaginarios". En *La tensión esencial* (págs. 263-289). D.F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I. (1974/2011). "Metodologías rivales de la ciencia; las reconstrucciones racionales como guías de la historia". En H. F. Imre Lakatos, *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales* (D. R. Nicolás, Trad., págs. 12-43). Madrid, España: Editorial Tecnos.
- Latour, B. (1999/2001). *La esperanza de Pandora. Ensayos sobre la realidad de los estudios de la ciencia*. (T. F. Aúz, Trad.) D.F., México: Gedisa.
- Lattery, M. J. (2001). "Thought Experiments in Physics Education: A Simple and Practical Example". *Science & Education*, 10(5), 485-492. doi:10.1023/A:1011265215942
- Lizcano, E. (2009). *Imaginario colectivo y creación matemática. La construcción social del número, el espacio y lo imposible en China y en Grecia*. Barcelona, España: Gedisa Editorial.
- Mach, E. (1905/1976). "On thought experiments". En *Knowledge and error* (págs. 134-147). Boston: D. Reidel Publishing Company
- Martín-Baró, I. (1983). *Acción e ideología. Psicología social desde Centroamérica*. San Salvador, El Salvador: UCA Editores
- Matthews, M. R. (1998). "Ernst Mach and thought experiments in science education". *Research in science education*, 18(1), 251-257. Obtenido de <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02356602>

- Moscovici, S. (1961/1979). *El psicoanálisis, su imagen y su público*. (N. M. Finetti, Trad.) Buenos Aires, Argentina: Editorial Huemul S. A
- Moue, A. S. (2008). "The Thought Experiment of Maxwell's Demon and the Origin of Irreversibility". *Journal for General Philosophy of Science*, 69-84. doi:10.1007/s10838-008-9061-1
- Nersessian, N. J. (1993). "In the Theoretician's Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling". *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, 291-301. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/192843>
- Norton, J. (1991). Thought experiments in Einstein's work. En T. & Horowitz, *Thought experiments in science and philosophy* (págs. 129-148). Maryland, United States of America: Rowman & Littlefield Publishers, INC.
- Ornelas, J. & Cíntora, A. (2012). "Platonismo cum externismo en la epistemología de los experimentos mentales". *Ludus Vitalis*, 20(37), 33-46. Obtenido de http://ludus-vitalis.org/html/textos/37/37_03_ornelas_cintora.pdf
- Ôzdemir, O. F. (2009). "Avoidance from thought experiments: fear of misconception". *Internationa Journal of Science Education*, 31(8), 1049-1068. doi:10.1080/09500690801932538
- Porlán Ariza, R. Rivero, A. Martín del Pozo R. (1998). "Conocimiento profesional y epistemología de los profesores, II: estudios empíricos y conclusiones". *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 16(2), 271-288. doi:ISSN 0212-4521, ISSN-e 2174-6486

- Pozo, J. (1987). ...Y sin embargo se puede enseñar ciencia. *Infancia y Aprendizaje: Journal for the study of education and development*, 10(38), 109-113. doi:10.1080/02103702.1987.10822165
- Pozo, J. I. & Gómez Crespo, M. A. (1998/2001). *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid, España: Ediciones Morata.
- Pro, A. (2003/2012). "La enseñanza y el aprendizaje de la física". En M. P. (Coord.), *Enseñar ciencias* (págs. 175-202). México: Editorial Graó/Colofón.
- Quintero-Zazueta, R. (2011). "La experimentación en matemáticas como epistemología de la imaginación". En L. M.-Z.-U. Rodríguez-Salazar, *Razonamiento matemático. Epistemología de la imaginación. (Re)pensando el papel de la epistemología en la matemática educativa* (págs. 167-191). México: Editorial Gedisa
- Ramos, d. R. (2010). Las ciencias naturales en el aula de la escuela primaria. Procesos de enseñanza: encuentros y desencuentros. En G. C. García, & Figura.ciones (Ed.), *Simulacros y simulaciones. La formación pedagógica para el analfabetismo científico y una modesta propoción en didáctica situada para las ciencias* (págs. 63-94). Guanajuato, México: Universidad de Guanajuato-Departamento de Educación. Obtenido de http://www.educacion.ugto.mx/educatio/PDFs/C_ACAD/configuraciones/simulacros_y_simulaciones.pdf
- Reiner, M. & Gilbert, J. (2000). "Epistemological resources for thought experimentation in science learning". *International Journal of Science Education*, 22(5), 489-506. doi:10.1080/095006900289741

- Reiner, M. & Burko, Lior M. (2003). "On the limitations of thought experiments in physics and the consequences for physics education". *Science & Education*, 12(4), 365-385. doi:10.1023/A:1024438726685
- Reiner, M. & Gilbert, J. (2004). "The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experiments in the learning of physics". *International Journal of Science Education*, 26(15), 1819-1834. doi:10.1080/0950069042000205440
- Reiner, M. (1998). "Thought experiments and collaborative learning in physics". *International Journal of Science Education*, 20(9), 1043-1058. doi:10.1080/0950069980200903
- Rosenblueth, A. (1971/2014). *El método científico* (22a Reimpresión ed.). México, D.F.: La Prensa Médica Mexicana S.A. de C.V.-CINVESTAV.
- Saville, S. (1976). "Why teach physics?". *Physics Education*, 11(3), 145-147. doi:10.1088/0031-9120/11/3/003
- Schaffer, S. (1989). Glass work: Newton's prisms and the uses of experiment. En D. P. Gooding, *The uses of experiment. Studies in the natural sciences* (págs. 67-104). Great Britain: Cambridge University Press.
- Shulman, L. S. (1986). "Those who understand: knowledge growth in teaching". *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- Sorensen, R. A. (1992). *Thought experiments*. New York: Oxford University Press, Inc.

- Soussan, G. (2003). *Enseñar las ciencias experimentales. Didáctica y formación*. (C. Iturra, Trad.) Santiago, Chile: Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe, UNESCO
- Stinner, A. (1990). "Philosophy, thought experiments and large context problems in the secondary school physics course". *International Journal of Science Education*, 12(3), 244-257. doi:10.1080/0950069900120303
- Strauss, A. & Corbin, J. (1990/2015). *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. (Fourth Edition) United States of America: SAGE Publications Inc.
- Szabó, G. T. (2010). *Intuition, imagination & philosophical methodology*. New York: Oxford University Press.
- Trabulse, E. (1987/2006). *La ciencia en el siglo XIX*. D.F., México: Fondo de Cultura Económica.
- Velentzas, A. & Halkia, K. (2010). "The use of thought and hands-on experiments in teaching physics". En D. S. M. Kalogiannakis (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference on Hands-on Science*, (págs. 284-289). Rethymno-Crete. Obtenido de <http://www.clab.edc.uoc.gr/HSci2010>
- Velentzas, A. & Halikia, K. (2011). "The 'Heisenberg's Microscope' as an Example of Using Thought Experiments in Teaching Physics Theories to Students of the Upper Secondary School". *Research in Science Education*, 41(4), 525-539. doi:10.1007/s11165-010-9178-1
- Velentzas, A. & Skordoulis, C. (2011). "The use of thought experiments in teaching physics theories of the 20th century to students of the

upper secondary education". *Proceedings of 11th International History Philosophy and Science Teaching*, (págs. 557-560). Thessaloniki, Greece.

Velentzas, A. & Halkia, K. (2013). "From Earth to Heaven: Using 'Newton's Cannon' Thought Experiment for Teaching Satellite Physics". *Science & Education*, 22(10), 2621-2640. doi:10.1007/s11191-013-9611-8

Wagensberg, J. (Ed.) (1990/2004). *Sobre la imaginación científica. Qué es, cómo nace, cómo triunfa una idea*. Barcelona, España: Tusquets Editores

Weinert, F. (2016). *The demons of science. What they can and cannot tell us about our world*. Switzerland: Springer.

Anexo 1 Manuscrito Revista Enseñanza de las Ciencias

Conocimiento de contenido de profesores: el experimento pensado de caída libre de Galileo

Resumen:

Al estudiar el conocimiento de contenido se suele sugerir poca integración entre las dimensiones cognitivas, didácticas y epistemológicas que lo constituyen dado que los instrumentos para estudiarlo ponen énfasis en una u otra dimensión. El propósito de este trabajo es indagar cuáles dimensiones se pueden estudiar de manera integrada a través de experimentos pensados. Mediante entrevista think aloud se realizó una investigación cualitativa con tres profesores de física del nivel secundario utilizando el experimento pensado de Galileo sobre la caída de los cuerpos. Encontramos que es posible estudiar las dimensiones cognitiva y epistemológica integradamente, e hipotetizamos su potencial para integrar la dimensión didáctica. Encontramos dificultades en los profesores con los procesos para imaginar la situación y experimentar en el pensamiento.

Palabras clave:

Conocimiento de contenido; Experimentos pensados; Modelos mentales; Caída libre; Galileo Galilei.

1. Los conocimientos de contenido docente

Las investigaciones sobre conocimiento profesional del docente de ciencias se suelen concentrar en estudiar el conocimiento de contenido, conocimiento pedagógico o conocimiento pedagógico de contenido. En el presente trabajo nos centramos en el conocimiento de contenido. Este es definido como cantidad y organización de los

conocimientos que el profesor posee de la disciplina científica que enseña (SHULMAN, 1986). Incluye conocimiento de diversas maneras de representar los conceptos de la disciplina científica; emplear la representación adecuada en el contexto pertinente; establecer relaciones entre representaciones de la misma naturaleza y con representaciones de conceptos o fenómenos distintos. Ello permite a los docentes establecer correspondencia entre conceptos y mundo físico; emitir explicaciones y predicciones; y construir modelos mentales para representar fenómenos por naturaleza inobservables (McConnell, Parker, & Eberhardt, 2013).

Al estudiar el conocimiento de contenido de profesores de ciencias se ha sugerido la falta de integración entre las distintas dimensiones que lo constituyen (Fischer, Borowski, & Tepner, 2012). Se aluden dimensiones epistemológicas (operar con los conocimientos para construir explicaciones, predicciones y representaciones mentales de fenómenos); cognitivas (la manera de organizar los conocimientos en esquemas y estructuras); lógico-matemáticas (contenido proposicional de los conocimientos y sus formas de representación matemática); y didácticas (formas de presentar el conocimiento a los estudiantes).

No obstante, los instrumentos tradicionales para estudiar los conocimientos de los profesores de ciencias -p. ej. cuestionarios o evaluaciones estandarizadas, entrevistas, observación de la práctica docente y revisión de planes de clase-, por sí solos poco nos dicen sobre cómo se integran las dimensiones del conocimiento docente, y arrojan primordialmente evidencia en una dimensión (Fischer et al., 2012; McConell et. al., 2013). Por lo regular, y de acuerdo con J. McConell y colaboradores (2013), se estudia los conocimientos de los profesores desde un enfoque centrado en las habilidades requeridas para aplicar

grandes ideas de la física a temas específicos, llegando no más allá de la manipulación superficial de conceptos.

En este trabajo proponemos los experimentos pensados para estudiar conocimientos de contenido (CC) de profesores de física en secundaria. Asumimos su potencial para dar cuenta de dos o más dimensiones integradas del CC. Nuestro propósito es describir las dimensiones integradas que se pueden estudiar a través de estos instrumentos.

La propuesta está enmarcada en las implicaciones derivadas del trabajo de Zongyi Deng (2001), quien precisa algunas características del conocimiento de contenido de profesores de física de secundaria. Deng distingue entre ideas clave para la enseñanza de la física en secundaria e ideas clave de la física como disciplina científica. Las ideas clave para la enseñanza de la física son cualitativas y cercanas al origen histórico de las ideas en física; en contraste las ideas clave de la física como disciplina científica son abstractas y de representación matemática compleja.

No sostenemos la ineficacia de los típicos instrumentos para investigar el CC, al contrario, son adecuados para indagar en dimensiones concretas del conocimiento profesional docente. Por ejemplo, los concept inventories ayudan en el análisis de la dimensión cognitiva. Los concept inventories se focalizan en conocimientos almacenados en la memoria; son apropiados para hacer explícitos conceptos centrales que los docentes conocen y cómo los organizan en esquemas y estructuras cognitivas. Al respecto, James T. Laverty y Marcos D. Caballero (2018) al analizar los concept inventories más comunes en física concluyen que estos ayudan a estudiar conceptos

nucleares de la disciplina; muestran su inconveniencia tanto para obtener información de la puesta en uso del conocimiento científico al elaborar modelos, emitir explicaciones y predicciones del comportamiento de fenómenos, como para conocer las maneras de hacer conexiones entre conocimientos científicos diversos.

Por su parte, McConell et. al. (2013) afrontan a los maestros con dilemas (preguntas abiertas) del tipo por qué y cómo en los que manifiesten la amplitud y profundidad de su comprensión de ideas físicas claves en la enseñanza. Su propuesta es útil para investigar la dimensión cognitiva del CC en amplitud y comprensión esperadas; es decir, alientan a los docentes a operar contenido específico indicando los conceptos mínimos por emplear. Por ejemplo, uno de sus reactivos dice: “Usando las palabras energía térmica y radiación explica ¿por qué tenemos clima? (Piense en las estaciones, el ciclo del agua, masas de aire y predicción del clima)” (McConnell et al., 2013, p. 729). Las respuestas de los profesores las categorizan conforme cinco códigos: concepto no presente en la respuesta, concepto inexacto, concepto confuso o vago, concepto exacto pero incompleto, y concepto exacto y completo.

Nosotros buscamos ahondar en la discusión de un instrumento para estudiar el conocimiento profesional de docentes de física que: (1) arroje información de dos o más dimensiones integradas del CC; (2) evite inducir el uso de saberes concretos que guíen el pensamiento docente y; (3) sea no estandarizado para mitigar que los profesores se limiten a reconocer información científica al eliminar opciones.

Consideramos los experimentos pensados con el potencial requerido para ello. Los experimentos pensados plantean escenarios imaginarios similares al origen de las ideas en física; los conceptos y

principios físicos con los cuales operar no están predeterminados; el experimentador pone en acción sus esquemas y estructuras de conocimientos para definir variables, construir y simular un modelo mental -considerando la manipulación de las variables definidas- y finalmente generar explicaciones, predicciones o conjeturas sobre un fenómeno físico.

Dado lo anterior, pretendemos dar respuesta al planteamiento ¿qué dimensiones del CC del docente de física en secundaria podemos estudiar de manera integrada a través de experimentos pensados?

Responder nuestra pregunta implica, siguiendo las reflexiones de Vicente Talanquer (2015), pensar cómo los profesores de física hacen uso de sus conocimientos y pensamiento en la práctica y no sólo describir lo que conocen sobre un contenido en particular. De acuerdo con Talanquer (2015), buscamos identificar patrones de razonamiento y acción efectivos que puedan promoverse en la formación del docente de ciencias.

2. Los experimentos pensados para estudiar conocimientos de contenido

Los experimentos pensados (EP) en física son un instrumento intelectual constituido por elementos narrativos -representan una situación física, ya sea un sistema o fenómeno-, y conocimientos teóricos que restringen la validez de la situación narrada. Este tipo de experimentación consiste en establecer y manipular variables. Se identifican variables en la situación física narrada; se varían las circunstancias de la situación; se establecen rangos de validez para las nuevas circunstancias; y se emite una conclusión o conjetura. El método

descrito es a grandes rasgos el proceso de experimentación en el pensamiento que por lo general se acepta desde la primera vez que lo describió Ernst Mach (1905/1976).

Desde el trabajo efectuado por Mach se ha matizado el proceso para experimentar en el pensamiento de acuerdo con el enfoque epistemológico que se aborde en el análisis. Aquí reconocemos el EP como un modelo mental (Miščević, 1992; Nersessian, 2002). Un modelo mental es una forma de organizar información y transformarla de un estado a otro (Nersessian, 1988, 2002). La información con la cual el experimentador opera es recuperada de la memoria producto de los estímulos de la narración en que se presenta el EP.

El experimentador emplea principalmente dos tipos de información (Nersessian, 2002, 2010): proposicional e icónica. La información proposicional está asociada a conocimiento de modelos teóricos ideales propios de la física, leyes, representaciones matemáticas y principios; suele calificarse de verdadera o falsa, tal que restringe el escenario imaginario con el cual se experimenta. Las representaciones icónicas refieren información perceptual, sensorial, representada por lo general, aunque no exclusivamente, por imágenes mentales; suele calificarse de exacta e inexacta, tal que el modelo mental represente con mayor o menor exactitud el fenómeno físico con el cual se experimenta en la mente.

3. Metodología

Para dar respuesta a nuestra pregunta llevamos a cabo sesiones de trabajo individual con tres profesores de física del nivel secundario. Las sesiones se llevaron a cabo durante el mes de mayo de 2018. Se

invitó a participar a docentes egresados de una escuela normal superior con una antigüedad menor a diez años, de manera que se hayan integrado al servicio docente a través de la evaluación de ingreso.

Las sesiones fueron guiadas por uno de los autores mediante entrevista think aloud, la cual consiste en solicitar al participante emitir sus pensamientos en voz alta conforme resuelve un problema o ejecuta una tarea. Jacqueline P. Leighton (2017) apunta que el pensar en voz alta es una manera narrativa de acercarse a los inobservables actos intersubjetivos de procesos superiores de pensamiento. De acuerdo con Leighton, permite al investigador acercarse a las maneras en que los participantes articulan pensamientos al ejecutar tareas o solucionar problemas.

Propusimos a los docentes la siguiente adaptación del experimento pensado de Galileo:

“El filósofo griego Aristóteles distinguió la existencia de cuerpos ligeros y pesados. De acuerdo con Aristóteles los cuerpos caen con una velocidad directamente proporcional a su peso.

Con base en lo pensado por Aristóteles podemos imaginar la siguiente situación. Imagine dos cuerpos, uno pesado y otro ligero, que se dejan caer desde la misma altura y al mismo tiempo. Para ambos cuerpos la resistencia del aire es constante e igual.

Posteriormente imagine que el cuerpo ligero es atado al cuerpo pesado. Este nuevo cuerpo, llamémosle compuesto, se deja caer desde la misma altura de la cual se dejaron caer los cuerpos por separado. La resistencia del aire sigue siendo constante e igual.

Describe la caída del cuerpo compuesto.”

A cada profesor le exhortamos a emitir sus pensamientos en voz alta durante la actividad, y si permanecía más de tres segundos en silencio se le indicaba “Sigue hablando”.

La sesión de trabajo tuvo duración de una hora para leer la situación narrada, operar y simular posibles escenarios imaginarios y emitir los pensamientos en voz alta. El discurso de los profesores fue audio grabado. La grabación se transcribió en su totalidad para generar un reporte verbal con lo dicho por cada participante. El análisis del reporte verbal se llevó a cabo con base en la construcción de códigos y categorías que explicamos abajo.

3.1 El experimento pensado de Galileo

El conocimiento de contenido de los docentes de física en secundaria es cercano al origen histórico de las ideas en física (Deng, 2001), por ello decidimos trabajar con un EP clásico como el de Galileo y estudiar el conocimiento de caída libre que poseen los docentes. La situación pensada por Galileo plantea imaginar un cuerpo pesado y uno ligero cayendo simultáneamente desde distintas alturas para analizar las causas potenciales de la rapidez de caída. El análisis de Galilei pone a prueba la veracidad y suficiencia de la teoría aristotélica (El Skaf, 2018) que explica la velocidad de caída de los cuerpos con relación al peso absoluto del móvil y la resistencia del medio.

El experimento de Galileo Galilei es una situación imaginaria que sintetiza la evolución del pensamiento físico galileano y no un caso idealizado que construye una teoría física. El EP de caída libre de los cuerpos de Galilei se rastrea desde el *De Motu* (1590) hasta sus *Diálogos* (1638) (El Skaf, 2018). Las restricciones que introduce Galileo a lo largo de este período le permiten obtener dos conclusiones distintas: 1) en el

vacío la velocidad de un cuerpo en caída libre es proporcional a su peso específico; 2) en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad.

De acuerdo con Rewad El Skaf (2018), Galileo hizo una división de la teoría aristotélica de caída de los cuerpos en dos principios: 1) la velocidad es proporcional al peso del cuerpo; 2) la velocidad es inversamente proporcional a la resistencia del medio. Galileo analizó cada principio estableciendo restricciones pertinentes para buscar las causas potenciales de la velocidad de caída de los cuerpos; el análisis del principio 1 condujo a la conclusión 1; el análisis del principio 2 llevó a la conclusión 2.

Galileo exploró las consecuencias de restringir la situación a: cuerpos de diferente y mismo material; cambios de altura; caída en el vacío y otros medios; la fricción en cada medio; peso específico y absoluto de los cuerpos; y variar el tamaño y forma de los cuerpos.

El experimento pensado y las restricciones analizadas por Galileo constituye un modelo teórico ideal (Giere, 1992; Nersessian, 2010); esto es, una idealización generalizada con valor epistemológico y heurístico al construir otros modelos mentales. El EP elegido encapsula nociones de gravedad y caída libre como ideas clave para la enseñanza de la física. Se eligió para aplicarse con profesores de física en secundaria después de una serie de pruebas piloto en sesiones individuales con estudiantes de posgrado en educación. Es común encontrar el EP en libros de texto de secundaria con los cuales trabajan los profesores de física; y su contenido es material de estudio en los temas “El trabajo de Galileo” y “Efectos de las fuerzas en la Tierra y en el Universo” de los Bloques I y II del programa de Ciencias 2011 de la Secretaría Educación

Pública en México, plan vigente en segundo grado de secundaria al momento de recolectar los datos. Además, el EP de Galileo es sugerencia didáctica en libro para el maestro (SEP, 1994; 2011).

4.2 Análisis del reporte verbal

Para procesar el reporte verbal de cada docente procedimos en tres etapas. Primero, la información contenida en los reportes verbales se organizó con base en categorías que nos permitieran presentar resultados en términos de 1) modelos mentales para representar la caída libre, y 2) acciones mentales efectuadas por los profesores al construir dichos modelos.

En segundo lugar, discutimos e interpretamos la estructura y amplitud de ideas en los modelos mentales para dar cuenta de las dimensiones del conocimiento de contenido de caída libre que pudimos estudiar con este experimento pensado. Finalmente, construimos y ponemos a discusión una conjetura de cómo se manifiestan integradas las diferentes dimensiones para este conocimiento de contenido y experimento pensado en particular.

Mencionamos antes que un experimento pensado es un modelo mental con el que se organiza y transforma información. Esta es la base de las categorías empleadas en la primera etapa para presentar los resultados en términos de modelos mentales.

- Información proposicional. Frases que tienen referente en un modelo teórico de caída libre; constituyen declaraciones o enunciados en las que subyace contenido científico que podría calificarse de verdadero o falso.

- Representación icónica. Remiten a entidades y objetos del sistema físico representado en la mente, las cuales no necesariamente son representaciones visuales.

- Transformación de la información. En esta categoría se relacionan expresiones propias de acciones cognitivas efectuadas por los docentes al elaborar explicaciones o conjeturas.

- Entidades teóricas. Son afirmaciones que dotan con propiedades teóricas a la información proposicional e icónica (masa, velocidad, peso); indican variables o restricciones establecidas para operar el modelo mental.

En el segundo momento de la primera etapa, para describir las acciones mentales efectuadas por los docentes, elaboramos categorías desde los datos mismos siguiendo el enfoque de la teoría fundamentada (Corbin & Strauss, 2014). Los términos y frases emitidas por los docentes que indican acciones mentales para transformar información las ordenamos de acuerdo con propiedades y características inherentes a lo hecho por los profesores. Expresiones del tipo “pienso que”, “sonaría ilógico”, “con las condiciones que tenemos”, “me imaginé”, “se supone” las tomamos cual propiedades de estas categorías.

Desde la teoría fundamentada se lee el reporte verbal preguntando y comparando constantemente para obtener las categorías. Las preguntas esenciales son ¿qué se está diciendo o haciendo? y ¿por qué? De acuerdo con Juliet Corbin y Anselm Strauss (2014) las respuestas a estos planteamientos son medio para estimular el pensamiento durante el análisis sobre los posibles significados de lo dicho por los participantes. Estos posibles significados se comparan

constantemente al contrastar conductas o temas semejantes en un ir y venir entre datos-categorías.

Para la segunda etapa de análisis discutimos e interpretamos los modelos mentales y las categorías construidas desde los reportes verbales. Cada reporte verbal se interpreta como instancia individual. Presentamos un sumario con nuestras interpretaciones de los modelos y acciones mentales de cada uno de los docentes para dar cuenta de las dimensiones del conocimiento del contenido de caída libre manifestadas por los participantes.

En la tercera etapa de análisis interpretamos familias de categorías con todos los reportes verbales. Por medio de un sumario con nuestras interpretaciones describimos cómo se manifiestan integradas las diferentes dimensiones de conocimiento para este contenido y experimento pensado.

4. Primera etapa. Resultados

Para dar cuenta de las dimensiones integradas del conocimiento de contenido de caída libre que se pueden estudiar a través del experimento pensado de Galileo, partimos de reconstruir los modelos y acciones de cada profesor. Presentamos por separado los modelos mentales de cada docente; distinguimos a los participantes como Profesor A, Profesor B y Profesor C. Extraemos fragmentos del reporte verbal generado por la entrevista think aloud para mostrar parte de la narrativa que envuelve los modelos de caída libre de los participantes.

4.1 Profesor A

Las citas extraídas de los reportes verbales las etiquetamos y numeramos. Por ejemplo, DA1 refiere a la cita 1 de la participación del docente A. En la Tabla 1 se leen las citas extraídas del reporte de A.

Etiqueta	Cita
----------	------

DA1	“primero me visualicé a Aristóteles allí disque dejándolos caer, pero recordé que era filósofo, entonces nada más observaba, entonces me imaginé los cuerpos nada más ya sea cayendo y luego anexándole el otro”
-----	--

DA2	“la velocidad sería distinta para el (cuerpo) compuesto, ya que al juntarse ambos cuerpos sumaron una masa mayor provocando una mayor velocidad en caída”
-----	---

DA3	“sin embargo y de acuerdo a la ley de gravedad, fuerza con la que los objetos son atraídos, es la misma no cambia ya que es una constante por lo que a la hora de la caída ambos caerán al mismo tiempo y con la misma velocidad”
-----	---

DA4	“ok Aristóteles dijo los cuerpos más pesados ¿no? y luego Galileo dijo ¡no! Caen al mismo tiempo. Entonces al momento de estar revisando así entrarías en un choque como ¡hayjos! ¿quién va a ganar? pues esa era la inquietud más que nada”
-----	--

DA5	“nos llevaría a comprobar las ideas de ambos, y a final de cuentas nos quedamos con la veracidad de Galileo, ¿sí? en cuanto a que todos los cuerpos caen al mismo tiempo a la Tierra, todo gracias a la gravedad”
-----	---

DA6	“yo pienso que si buscamos puedo llegar a encontrar otra solución. Fíjate que hablando de esto pues nos llevaría a comprobar las ideas de ambos (Aristóteles y Galileo) y al final nos llevaría a que todos
-----	---

los cuerpos caen al mismo tiempo a la Tierra, todo gracias a la ley de gravedad”

Al reconstruir los modelos mentales de A, conforme las categorías descritas en el apartado 4.2, tenemos:

(1) Modelo aristotélico. La velocidad de caída libre de un cuerpo es directamente proporcional a su masa.

(2) Modelo galileano. La velocidad y tiempo de caída de los cuerpos son variables dependientes de la gravedad de la Tierra, mientras que la masa de los cuerpos resulta inoperante. Por lo tanto, velocidad y tiempo de caída libres son directamente proporcionales a la fuerza de gravedad.

El participante A exterioriza conocimiento del modelo aristotélico y galileano de caída libre. Del modelo aristotélico sabe que la velocidad de caída de un cuerpo es directamente proporcional a las masas. Del modelo galileano muestra reconocer la gravedad -a la cual alude como “ley de gravedad”- como la variable que determina la velocidad de caída de un cuerpo, tal que “todos los cuerpos caen al mismo tiempo a la Tierra”.

El participante A, al contrastar los dos modelos mentales para dictar “¿quién va ganar?”, no prescribe criterios explícitos para fallar a favor de la explicación galileana (ver DA6). Para comprender cómo determina que “todos los cuerpos caen al mismo tiempo”, reconstruimos sus acciones mentales en el gráfico x.

El proceso de acciones mentales del profesor A no es lineal, estructurado u ordenado. Las acciones son simultáneas, de manera que, al restringir la situación que imagina con variables concretas también sopesa y reflexiona tales restricciones. Al decretar una conclusión la sopesa planteando la posibilidad de otros escenarios imaginarios para reafirmar dicha conclusión. Describimos las acciones mentales en orden porque facilita reconstruir lo que se hace con el contenido en el contexto de este experimento pensado.

Imaginar el escenario: A comienza por imaginar el escenario donde ocurre la caída de cuerpos. El contenido icónico para ambos modelos de A son los tres cuerpos -pesado, ligero y compuesto-, la Tierra y Aristóteles, todos descritos en la narración del EP (ver DA1).

Restricción: El profesor vía explícita dota con propiedades físicas y teóricas sólo a los tres cuerpos (velocidad, tiempo y caer). Por su parte, la Tierra implícitamente es concebida con la propiedad atracción gravitacional. Aristóteles es una representación icónica que deja de lado desde el inicio. Dotar con propiedades físicas y teóricas a la representación icónica permiten al participante A establecer, operar y explorar variables o restricciones en sus modelos mentales de manera dinámica.

Sopesar ideas: Las restricciones le ayudan a sopesar ideas, es decir, reflexionar y describir la caída de los cuerpos empleando distintos tiempos verbales: caer, cayendo, caída, caen. En primera instancia, para A, el cuerpo compuesto tendría mayor velocidad de caída por efecto de la masa (DA2); luego, contrapone la ley de gravedad (DA3). Fija una variable independiente -gravedad- que determina la velocidad y tiempo de caída, lo que a su vez le lleva a decretar la conclusión. Al sopesar su

idea plantea la posibilidad de un segundo escenario - “encontrar otra solución”-, el cual no detalla y explora, pero del cual se vale para reafirmar y justificar su conclusión.

Decretar conclusión: El profesor hace de la ley de gravedad el agente principal y variable independiente que determina lo que puede ocurrir en cualquier escenario imaginario.

En consecuencia, A se inclina por el segundo modelo mental y afirma que todos los cuerpos caen al mismo tiempo y velocidad, siendo la “ley de gravedad” la entidad teórica determinante de todo lo que pueda ocurrir en cualquier potencial escenario imaginario de caída libre.

4.2 Profesor B

En la tabla x presentamos citas extraídas del reporte verbal de B.

Etiqueta	Cita
----------	------

DB1	“Pues la resistencia del aire cambiaría ¿no? Según eso porque sería compuesto y sería más ¿masa? Rompería más ¿qué? Más el aire. Esa sería mi imaginación. Y tendría mayor velocidad el compuesto que por separado (lee de nuevo en voz alta el EP)”
-----	--

DB2	“se supone que Aristóteles dijo que si son lanzados desde la misma altura un cuerpo ligero y un cuerpo pesado caerán al mismo tiempo. Pero al ser compuesto siento que viajaría a mayor velocidad porque tiene mayor masa y rompería más la resistencia del aire”
-----	---

DB3	“según Aristóteles ambos deben caer al mismo tiempo al ser lanzados desde la misma altura”
-----	--

DB4	“un cuerpo compuesto caerá más rápido al ser mayor su masa”
-----	---

DB5 “si yo lo estuviera haciendo, y que lo he hecho en clases, pero sólo con dos objetos, pero nunca he hecho un compuesto, pensaba en hacerlo. Si lo hiciera en este momento ¿qué pasaría? Si ¿sí van a caer al mismo tiempo?, o sea poner los tres, el compuesto, el ligero y el pesado al mismo tiempo y comprobar qué es lo que pasaría realmente”

DB6 “suena ilógico con mi respuesta ahorita ya analizándolo de nuevo. Se supondría que si son lanzados desde la misma altura tendrían que volver a caer igual, aunque fuera compuesto o fuera el ligero y el pesado, porque ambos caerían al mismo tiempo y tendrían que [declaración incompleta] más bien siento que sería la forma ¿no? en que los pondrían si formaran no sé, un círculo a tener una hoja extendida, sería diferente el cómo se va rompiendo el aire”

B explícitamente alude al modelo teórico ideal de Galileo Galilei erróneamente adjudicado a Aristóteles en varias ocasiones. De este modelo sabe que los cuerpos al caer desde una misma altura caerán con igual aceleración, llegarán a tierra al mismo tiempo. Determina una conclusión parcial al afirmar que un cuerpo con mayor masa rompe el aire con mayor facilidad; esto es, un cuerpo con mayor masa al caer a través del aire adquiere una masa inercial mayor a la fuerza de fricción entre el cuerpo y el aire. Con la información emitida por B reconstruimos dos modelos mentales, uno aristotélico y otro galileano:

(1a) Modelo aristotélico: la masa de un cuerpo en caída tiene una relación directamente proporcional con la fuerza para romper la resistencia del aire, tal que adquiere una velocidad de caída directamente proporcional con su masa e inversamente proporcional con la resistencia del aire.

(2) Modelo galileano: cuerpos que caen simultáneamente desde la misma altura adquieren igual velocidad de caída independientemente de sus masas, tal que al suelo llegan al mismo tiempo.

B percibe la contradicción entre ambos modelos; esto le lleva a introducir la variable forma del cuerpo. Así, tenemos una segunda fase de su modelo aristotélico:

(1b) Modelo aristotélico: la velocidad de caída que adquiere un cuerpo está determinada por su forma y en relación proporcional inversa con la resistencia del aire, tal que la forma del cuerpo puede contribuir en mayor o menor medida a romper dicha resistencia.

Las acciones mentales efectuadas por B para contrastar los modelos mentales 1a y 2 que llevan a 1b se sintetizan en el siguiente gráfico:

Al igual que en A, el proceso de acciones mentales de B no es lineal o sistemático, es simultáneo; una lectura ordenada nos ayuda a ver lo hecho por B.

Imaginar escenario: B comienza por imaginar la situación y a lo largo de su intervención se refiere a las representaciones icónicas relevantes, aire, cuerpo pesado, ligero y compuesto.

Restricción: B dota al aire con la entidad teórica resistencia y a los cuerpos con masa. Formula la proposición: un cuerpo con mayor masa rompe con más facilidad el aire (DB2).

Decretar conclusión: como conclusión parcial sostiene que el cuerpo compuesto tendría mayor velocidad de caída (DB4).

Evocar: Luego de imaginar el escenario, restringirlo y decretar una conclusión parcial (modelo 1a), B lee una vez más el EP y evoca el modelo teórico ideal galileano (ver DB2- DB4).

Sopesar ideas: Con la proposición evocada (DB2) sopesa su conclusión parcial y la mantiene (DB4). Al sopesar sus ideas plantea el potencial del escenario imaginario para experimentar físicamente en el aula, percatándose de la contradicción entre sus modelos aristotélico y galileano (DB5-DB6).

Evalúa: Reflexiona su modelo mental aristotélico (1a) en contraste con el modelo mental galileano y concreta la segunda versión de su modelo 1a al añadir la forma como propiedad física de los cuerpos en DB6.

En síntesis, B opera internamente y obtiene una segunda versión del modelo mental aristotélico al introducir la restricción forma de los cuerpos. Las consecuencias de introducir en su modelo esta última propiedad ya no es explorada con más detalle.

4.3 Profesor 'C'

La siguiente tabla presenta algunas citas del reporte verbal de C.

Etiqueta	Cita
----------	------

DC1	“Habla de dos cuerpos, entonces, uno muy pesado, uno ligero. Pues la idea que menciona Aristóteles, su teoría que el peso influía en la caída de los cuerpos. En ese caso el cuerpo compuesto obviamente caería más rápido. Pero habla de la resistencia del aire [relee el EP] La resistencia del aire sigue siendo constante”
-----	---

DC2 “Yo lo imaginé muy sencillo, muy simple, tal vez demasiado simple. Pues según lo que menciona allí Aristóteles que creía que los cuerpos de diferente peso caían a diferente velocidad, allí te menciona que hay un cuerpo más pesado que el otro y otro más ligero. Entonces, en esa lógica pues el cuerpo pesado caería más rápido y el ligero [declaración incompleta] Con las condiciones que tenemos realmente la resistencia del aire, que es igual, no afectaría el resultado para mí, porque menciona que son lanzados a la misma altura, pero la resistencia del aire es igual, es constante. Por lo tanto, para mí no, de acuerdo con esa idea el cuerpo pesado caería más rápido de todos modos, porque no afectaría mucho la idea del aire”

DC3 “Un cuerpo compuesto de acuerdo a las ideas de Aristóteles, que suponía que los cuerpos de objetos más pesados eran más rápidos que los de los ligeros, al juntarlos el peso aumentaría y su velocidad también”

DC4 “la velocidad del cuerpo compuesto sería igual a la suma del cuerpo A que podría representar al más pesado y del cuerpo B que representa al más ligero. Por lo tanto, el resultado de la velocidad final es mayor ya que incrementaría el peso. Un cuerpo compuesto de acuerdo con las ideas de Aristóteles que suponía que los cuerpos de objetos más pesados eran más rápidos que los de los ligeros y al juntarlos el peso aumentaría y su velocidad también”

DC5 “más o menos en ese tiempo yo creo que no pensaban en los papeles, ni en el aire, ni nada, bueno quiero suponer, y tampoco iban más allá como para pensar si había una constante de velocidad en general”

DC6 “no sé qué ideas tenían anteriormente de la velocidad de caída de los cuerpos, no sé si la habían registrado o no y también recordar que en ese tiempo no había experimentos en el espacio, y ahora sí los hay, y recordar que sí hay variantes en el espacio cuando eliminas toda la resistencia hacia los objetos [...] el espacio está libre de eso (refiriéndose a la resistencia) de esas presiones que aquí sí tenemos”

DC7 “ahorita está comprobado que sí, la resistencia se opone a la caída del cuerpo, además la forma que tiene ese objeto y cómo rompe el aire. Imagínate aventar una hoja de papel que implique haya más resistencia del aire, a pesar de que sea el mismo aire, pero como es un objeto más ligero, sí hay más oposición del aire hacia el objeto”

DC8 “si nos basáramos en la velocidad actual de la caída de los cuerpos (...) como ya ahorita sabemos que sí hay una constante y que nada más hay que diferenciar que varía de acuerdo con la resistencia que pone el aire sobre el objeto”

El participante C alude explícitamente a dos modelos teóricos ideales:

(1) Modelo aristotélico: la rapidez de caída de un cuerpo es directamente proporcional a su peso e inversamente proporcional a la resistencia del aire.

(2) Modelo galileano: en ausencia de aire la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por la constante de atracción gravitacional terrestre. En presencia de aire la velocidad de caída de un cuerpo está determinada por su forma y la constante gravitacional, y es inversamente proporcional a la resistencia del aire.

C distingue entre dos modelos históricos para un mismo fenómeno físico. Por un lado, expone sus ideas sobre cómo se concebía la caída libre “anteriormente” en el marco aristotélico (DC5-DC6). Por otro, expone cómo “actualmente” es concebida la caída libre (DC6-DC8).

El gráfico x las acciones mentales de C al explicar y distinguir entre los modelos aristotélico y galileano para la caída libre. Abajo se pueden leer en orden.

Imaginar escenario: inicia imaginando la situación a partir de la información icónica del EP (DC1-DC2).

Decretar conclusión: decreta una conclusión aristotélica en la que dota con agencia al peso de los cuerpos en el contexto de “las condiciones que tenemos” (ver DC2).

Restricción: al tiempo de concluir restringe la situación aludiendo a “la resistencia del aire” (DC2). La restricción le lleva a afirmar que “con las condiciones que tenemos” la conclusión aristotélica se mantiene (DC2).

Evocar: evoca el modelo teórico ideal de caída libre galileano al que alude como “ahora” y “ahorita”. Invita a recordar que la caída libre en el espacio y la Tierra se manifiesta de manera distinta (DC6-DC8).

Sopesar ideas: sopesa sus pensamientos en torno a la restricción resistencia del aire (DC1, DC2, DC6-DC8). Invita a imaginar “aventar una hoja de papel” (DC7) y distingue entre experimentos de caída libre en el espacio (DC6) y en presencia de aire para resaltar mayor oposición del aire hacia objeto ligeros (DC7-DC8).

Evaluar: La conclusión aristotélica inferida la evalúa desde el marco de pensamiento galileano, y explica la caída libre con uno y otro modelo para resaltar que se obtendrían conclusiones distintas con diferentes marcos teóricos.

5. Segunda etapa. Discusión de resultados

Cada uno de los dominios generales del conocimiento profesional docente identificados por Shulman (1986) -conocimiento de contenido, conocimiento pedagógico de contenido y conocimiento curricular- están integrados a su vez por subdominios: conocimiento proposicional, casos de conocimiento y estrategias de conocimiento.

El conocimiento proposicional y los casos de conocimiento poseen estructuras lógicas y psicológicas. Estas estructuras son las dimensiones cognitivas, lógico matemáticas y didácticas del conocimiento de contenido. La dimensión cognitiva es la manera de organizar y almacenar conocimientos en esquemas y estructuras que expresan diversas maneras de representar conceptos y principios físicos. La dimensión lógica corresponde a relaciones sintácticas y semánticas entre principios y conceptos físicos para emitir juicios de verdad y establecer la validez o invalidez de las relaciones establecidas (Shulman, 1986), tal que se conoce cuándo emplear la representación adecuada en el contexto pertinente y cuándo establecer relaciones entre representaciones de misma o distinta naturaleza. La dimensión matemática es la representación matemática del orden y relación dada a conceptos y principios físicos. La dimensión didáctica, ligada al conocimiento pedagógico de contenido, es una estructura de conocimiento que permite

a los docentes enseñar el contenido caracterizado en la dimensión cognitiva.

Las estrategias de conocimiento del conocimiento de contenido son acciones que emergen cuando los docentes afrontan problemas que exigen elaborar explicaciones, modelos mentales y predicciones poco simples o incompatibles con los conocimientos previos. Esto es la dimensión epistemológica del conocimiento de contenido.

Nuestra intención es responder ¿qué dimensiones integradas del CC del docente de física en secundaria podemos conocer a través de experimentos pensados? Los resultados descritos en el apartado anterior en términos de modelos y acciones mentales nos llevan a presumir la posibilidad de estudiar de manera integrada las dimensiones cognitiva y epistemológica del conocimiento de contenido de caída libre con el experimento pensado de Galileo. Presentamos por separado la expresión individual de las dimensiones cognitiva y epistemológica; en el próximo apartado ponemos a discusión nuestra interpretación de cómo aparecen integradas estas dimensiones.

6.1 Dimensión cognitiva

Los modelos mentales reconstruidos representan los conocimientos de contenido de los docentes. Los conceptos centrales exteriorizados en los modelos nos permiten estudiar la dimensión cognitiva en amplitud y organización de ideas.

Los dos principios aristotélicos que analizó Galilei, las restricciones desde las que efectuó su análisis y conclusiones, descritas

en el apartado metodológico, son referencia para apreciar la amplitud del conocimiento de contenido de caída libre de los docentes en la Tabla 1.

Docente intuitivo/aristotélico	Conclusión galileana		Principio						
	Restricciones								
	1	2	1	2	a	b	c	d	e
f									
A		x	x		x				
B		x	x	x	x	x		x	
x									
C		x	x	x	x		x	x	
x									

Restricciones: a) cuerpos de diferente y mismo material; b) cambios de altura; c) caída en el vacío y otros medios; d) la fricción en cada medio; e) peso específico y absoluto de los cuerpos; y f) variar el tamaño y forma de los cuerpos.

Del modelo teórico ideal galileano los tres docentes prueban conocer la conclusión 2: en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad. Los profesores distinguen el principio aristotélico “la velocidad es proporcional al peso de los cuerpos”, mientras que B y C indican que la velocidad de caída es inversamente proporcional a la resistencia del medio (aunque se refieren exclusivamente al aire).

En el proceso de construcción de su modelo mental los docentes manifiestan ideas incompletas sobre las restricciones pensadas por Galileo al analizar los principios aristotélicos. Por ejemplo, aunque los tres participantes reconocen que todos los cuerpos caen con la misma velocidad, ninguno de ellos explora la idea de comparar la caída de cuerpos de diferente y mismo material, limitándose a indicar su conclusión para todos los cuerpos o ejemplificar con una hoja de papel (casos B y C).

B y C consideran la resistencia del aire como restricción para analizar la fricción en el medio de caída, aunque no exploraran la idea en otros medios de caída. Además, B y C señalan la forma de los cuerpos como propiedad física que contribuye a restar la resistencia del aire durante su caída. C es el único que explícitamente alude a la caída en ausencia de aire. B y C explícitamente aluden a la restricción “misma altura” para arribar a su conclusión.

Para apreciar la organización de las ideas expresadas e identificar los conceptos centrales empleados por los participantes representamos de manera esquemática los modelos mentales. Por cuestiones de espacio describimos a modo de ejemplo el esquema de las ideas del profesor C, quien manifestó conocer el modelo galileano y aristotélico que explican las causas potenciales de rapidez de caída de los cuerpos.

Para el modelo aristotélico, C afirma que la velocidad de caída de los cuerpos es consecuencia de la interacción entre el peso del cuerpo y la resistencia del aire. Para su modelo galileano distingue dos posibilidades para explicar las causas potenciales de rapidez de caída de un cuerpo: en ausencia de aire la constante gravitacional es el concepto

central y determina la velocidad de caída; en presencia de aire la velocidad de caída se explica como la interacción entre gravedad, resistencia del aire y forma del cuerpo (que a su vez puede contrarrestar o no la resistencia del medio).

C posee un par de modelos mentales con pocos conceptos y limitados enlaces. Cada esquema se aprecia con jerarquías conceptuales simples, poco elaboradas. Sin embargo, la simplicidad no implica que sus ideas son poco efectivas para elaborar un modelo mental de la situación planteada por el experimento pensado; por el contrario, sus ideas son útiles y prácticas para explicar las causas potenciales de la velocidad de caída en ausencia y presencia de aire.

En síntesis, la sencillez conceptual de los modelos mentales de C no implica una comprensión simple y superflua de caída libre. La representación esquemática de sus modelos no refleja un concepto o variable nuclear que determine la causa de velocidad de caída libre de los cuerpos. Los modelos poseen variables independientes (constante gravitacional, forma y peso del cuerpo) y dependientes (resistencia del aire, que puede oponer menor fuerza al móvil, por el peso o forma de este último) que determinan la velocidad de caída.

Pensamos que, con un análisis más detallado de los diagramas de organización de ideas y de la Tabla 1, que por cuestiones de espacio no realizamos aquí, se podría reconocer las concepciones sobre caída libre presentes en el pensamiento docente y analizar los reportes verbales en términos de los códigos empleados por McConell y su equipo (2013): conceptos no presentes en las explicaciones docentes, conceptos inexactos, conceptos vagos, conceptos exactos pero incompletos, y conceptos exactos y completos.

6.2 Dimensión epistemológica

Las acciones de mayor complejidad que emitir principios teóricos y prácticos; y que elaborar explicaciones, modelos mentales y predicciones simples o compatibles con los conocimientos previos, son las que Shulman (1986) llama estrategias de conocimiento de contenido. Nosotros presentamos e interpretamos tales acciones, y la finalidad de estas, como dimensión epistemológica.

Las acciones realizadas por los profesores -al construir un modelo mental para explicar las causas potenciales de velocidad de cuerpos en caída libre-, distan de ser simples y compatibles con la experiencia cotidiana. La caída libre conlleva nociones tácitas relacionadas con la forma y rotación de la Tierra, atracción de cuerpos al centro de la Tierra, peso de los cuerpos y fuerza de gravedad (Blown & Bryce, 2013). Alrededor de estas nociones existen concepciones cualitativas erróneas entre estudiantes y profesores (Kavanagh & Sneider, 2006a, 2006b).

Antes reconstruimos por separado las acciones de los participantes para representar el proceso de construcción y conclusión de modelos mentales. Los esquemas nos permiten ver que simultáneamente se identifican conceptos centrales, se modifica la situación imaginada y se reconstruye las ideas de caída libre con la información que los docentes evocan, piensan y reflexionan. Las ideas que evocan se transforman en restricciones teóricas (todo depende de la gravedad, dice A) o físicas (forma de los cuerpos, altura, en ausencia o presencia de aire, según C). Las restricciones ayudan a transformar y variar los escenarios imaginarios. Por ejemplo, C modifica el escenario al proponer imaginar la situación en el espacio. Tras pensar las ideas

concretan un modelo mental para explicar la caída de los cuerpos, en menor o mayor medida similar a un modelo teórico ideal.

Las acciones mentales de los tres participantes comparten características, por lo que las categorías podemos asociarlas en familias como se aprecia en el siguiente gráfico.

Las acciones no representan un procedimiento lineal y universal. Sin afirmar que los tres docentes efectúan todas las acciones en secuencia lineal, podemos sintetizar algunas reflexiones siguiendo dicho orden.

Imaginar: Comienzan por imaginar y pensar en la situación que se plantea para experimentar. A, por ejemplo, descarta la relevancia de imaginar a Aristóteles, quedándose sólo con la imagen de los distintos cuerpos involucrados en la situación. B y C rescatan de la narración la representación icónica de los cuerpos.

Restringir: Los profesores no sólo reconocen y enuncian una idea aristotélica o galileana de caída libre tal como la han incorporado a sus estructuras y marcos de conocimiento. Exponen los modelos mentales conforme restringen la situación imaginaria con información proposicional o icónica distintas. De acuerdo con la restricción establecida es la conclusión emitida. Identificamos que restringen dotando con agencia a una entidad teórica o física. A emplea la gravedad como concepto nuclear. B, al restringir que la caída de los cuerpos es desde la misma altura, dota con agencia la forma de los cuerpos luego de considerar el peso y resistencia del medio. C, en cambio, restringe los escenarios al diferenciar la fuerza de resistencia del medio en situaciones con presencia o ausencia de aire.

Sopesar: Simultáneo a restringir, sopesan las consecuencias de tales restricciones. Sopesar ayuda a los participantes a dilucidar el mejor modelo explicativo del fenómeno en cuestión. El acto de sopesar, al igual que restringir, es particular y diferenciado. Tanto A como B sopesan los modelos galileano y aristotélico mediante contraste. Mientras A, pregunta “¿quién va a ganar?” entre la teoría aristotélica y galileana, B exterioriza preguntas que le conducen a rescatar información de la memoria (ver DB5) y se percata de la contradicción entre los dos modelos. B no expresa criterios para sopesar ambos modelos y responder sus preguntas. Sin embargo, al trasladar sus pensamientos a un escenario físico (DB5) evalúa internamente su modelo aristotélico inicial y añade la forma como nueva restricción (DB6), a la cual dota con agencia para determinar la velocidad de caída de los cuerpos.

Por su parte, C sopesa la situación con una estrategia distinta, imagina dos escenarios: en el espacio (con ausencia de aire) y con hojas de papel (en presencia de aire). Estos escenarios ofrecen a C la oportunidad de explorar los modelos aristotélico y galileano pensando en la agencia de la resistencia del medio, forma de los cuerpos y aceleración gravitacional.

Concluir: Dotar con agencia distintos elementos icónicos (forma del cuerpo, como hace B), o proposicionales (gravedad, como hace A) para restringir y sopesar la situación imaginaria determina la conclusión de A y B.

Para A, la gravedad es la entidad teórica que determina las causas potenciales de caída de los cuerpos; siempre se llegará a la misma conclusión sin importar los escenarios pensados (ver DA6).

B, con base en las restricciones “desde la misma altura” y la forma de los cuerpos, sopesa la agencia del peso de los cuerpos y la fuerza de resistencia del medio, lo que le conduce a concluir con el modelo aristotélico 1b.

La conclusión de C emerge de una doble restricción para la caída de los cuerpos: en ausencia y presencia de aire. Sopesa las consecuencias de ambas condiciones para valorar los modelos galileano y aristotélico. C, considera “las condiciones” de la situación experimental y hace una inferencia desde el modelo aristotélico para concluir (DC4).

Las acciones de cada profesor son distintas porque persiguen una finalidad también diferente. Las acciones de A, sin comprometerse en una reflexión crítica de los modelos, consisten en enunciar y asumir la veracidad del modelo galileano, en específico, sostiene la gravedad como variable determinante en cualquier condición imaginable de caída libre. El participante B busca la mejor explicación sobre causas potenciales de caída libre al percatarse de la contradicción entre un modelo y otro. C pretende identificar la mejor conclusión de acuerdo con, según mencionó, las condiciones narradas en el experimento pensado. Para ello, contextualiza históricamente los dos modelos y explora sus condiciones de validez.

La finalidad de A es enunciar la gravedad, desde el modelo galileano, como causa única para explicar la velocidad de caída de los cuerpos. B problematiza la situación con el fin de encontrar una explicación convincente para las causas potenciales de velocidad de los cuerpos en caída libre. C explora condiciones de validez para dos modelos que explican el mismo fenómeno físico, con el propósito de

adoptar el mejor para las condiciones narradas en el experimento pensado.

6.3 Dimensiones didáctica

La dimensión didáctica del conocimiento de contenido está ligada al dominio general conocimiento pedagógico de contenido; ayuda a los docentes a organizar cómo enseñar el contenido del conocimiento. La relación entre lo que se conoce y lo que se enseña implica una naturaleza pedagógica del conocimiento de contenido. En este sentido, conjeturamos la posibilidad de estudiar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido de caída libre empleando el experimento pensado de Galileo.

Aventuramos la conjetura dado que B y C remiten al clásico ejemplo de la hoja de papel extendida y comprimida que caen para reflexionar sobre la forma de los cuerpos y resistencia del aire como causas potenciales de velocidad de caída.

Para corroborar esta conjetura hace falta comparar los reportes verbales de los docentes al experimentar en el pensamiento con el discurso docente al trabajar en el aula el contenido de caída libre. Sin embargo, caracterizar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido para la caída libre requiere un trabajo de análisis detallado porque es difícil saber dónde termina esta dimensión y dónde comienza el dominio conocimiento pedagógico de contenido, el cual a su vez es un término polisémico y definido con poca precisión (Neumann, Kind & Harms, 2018; Talanquer, 2015). En consecuencia, sería pertinente estudiar la dimensión didáctica del conocimiento de contenido de caída libre mediante el experimento pensado de Galileo, a la par que se estudia

el dominio general conocimiento pedagógico de contenido a través de los instrumentos desarrollados para ello, tal que se puedan caracterizar similitudes, diferencias y enlaces entre la dimensión y dominio dichos.

7. Tercera etapa. Dimensiones integradas del conocimiento de contenido

No podemos afirmar categóricamente que la dimensión didáctica se pueda estudiar de manera integrada con la dimensión cognitiva y epistemológica en el contexto de la experimentación en el pensamiento para el contenido revisado, pero dejamos la conjetura porque aparecen referencias al trabajo áulico en el reporte verbal.

En nuestros resultados la dimensión cognitiva y epistemológica aparecen integradas; los docentes no proceden con actos diferenciados. Es decir, los participantes no enuncian primero información proposicional, seguido no ordenan la información y, finalmente, no elaboran un modelo mental. Por el contrario, todas estas acciones son simultáneas.

El gráfico X muestra la integración de los modelos mentales con las familias de categorías de las acciones mentales de los tres participantes. Desde el comienzo los profesores imaginan constituyentes, restringen la situación y la sopesan conforme los modelos teóricos ideales de Aristóteles (1er modelo mental) y Galileo (2do modelo mental).

A partir de la narración del EP los tres participantes comienzan a imaginar el escenario imaginario. El primer modelo mental de los tres docentes emerge desde el momento en que el escenario imaginado es

restringido explícita o implícitamente con información proposicional cuyo referente es el modelo teórico ideal de Aristóteles.

A la par que imaginan y restringen la situación desde el referente aristotélico evocan el modelo teórico ideal galileano para fijar otras restricciones teóricas y físicas. Hasta aquí tienen las bases del primer y segundo modelo mental (aristotélico y galileano respectivamente). Conforme proceden, revisan ambos modelos mentales sopesando las consecuencias de restringir la caída libre a una u otras variables. Luego de revisar y sopesar ambos modelos, cuando los profesores decretan una conclusión (A fija su modelo galileano como conclusión; B finaliza con su segunda versión de modelo aristotélico; y C considera pertinente el modelo aristotélico dada la situación).

La integración cognitiva y epistemológica se manifiesta cuando la dimensión cognitiva se pone en acción para elaborar explicaciones de caída libre, es decir, efectuar actos mentales (imaginar, evocar, restringir, sopesar, evaluar) con el contenido para revisar y valorar los elementos del contenido que en la situación experimental contribuyen a explicar un fenómeno físico. Desde el momento en que los docentes comienzan a imaginar y restringir la situación experimental, explicitan algunas entidades teóricas, icónicas y proposicionales que constituyen sus modelos mentales de caída libre. Los modelos mentales de caída libre no son enunciados tal y como se han incorporado en los esquemas mentales, sino que se recrean, se sopesan, se revisan a la luz de la situación imaginaria que están imaginando y pensando. Al final, la conclusión es una transformación del modelo teórico ideal internalizado que en la acción tiene la finalidad de explicar las condiciones del experimento pensado.

La dimensión cognitiva y epistemológica del conocimiento de contenido (CC) de caída libre se manifiestan integradas porque los profesores restringen la situación y establecen las entidades e información que consideran relevantes o que logran evocar dada la narración del EP. En contraste, los instrumentos diseñados para operar con variables preestablecidas estudian una sola dimensión del CC al focalizar la atención en algunos elementos teóricos y proposicionales, por ejemplo, los concept inventories o grandes dilemas. Sin embargo, como antes mencionamos, trabajos efectuados con instrumentos diseñados para estudiar una dimensión del CC sostienen la poca integración entre dos o más dimensiones. Con base en lo aquí presentado, defendemos que la poca integración observada entre las dimensiones que integran el CC es propiamente metodológica y no ontológica.

6. Conclusiones

Propusimos los experimentos pensados para estudiar el CC con la intención de obtener información de dos o más dimensiones integradas del CC evitando inducir el uso de saberes concretos que guíen el pensamiento docente y para mitigar que los profesores se limitaran a reconocer información científica. Nuestro propósito era describir las dimensiones del conocimiento de contenido que de manera integrada se pueden estudiar a través de la experimentación en el pensamiento a través de un contenido y experimento particular.

Destacamos haber logrado estudiar al menos dos dimensiones integradas del CC sin inducir el empleo de variables concretas que guíen el pensamiento docente a diferencia de los instrumentos estandarizados. Evitamos que la actividad se redujera a reconocer información científica

estudiando las dimensiones del conocimiento contenido desde las restricciones y variables determinadas por los propios profesores.

El análisis evidencia la ayuda del experimento pensado de Galileo para estudiar el conocimiento de contenido sobre caída de los cuerpos integrando las dimensiones cognitiva y epistemológica. En el proceso de experimentar en el pensamiento fueron los docentes quienes determinaron las entidades teóricas y principios con los cuales representar y explicar mentalmente el fenómeno de caída libre. Los docentes con información evocada desde sus propios conocimientos, sin guía asentada por el entrevistador, elaboraron sus modelos mentales.

Los modelos mentales de los docentes, como el del participante C reseñado en el subapartado donde discutimos la dimensión cognitiva, se manifestaron simples y poco extensos, aún así, prácticos dada la situación narrada. En paralelo explicitaron sus modelos mentales, imaginaron y restringieron la situación, evocaron elementos de los modelos teóricos ideales, los revisaron y sopesaron para concluir con un modelo de caída libre pertinente con los elementos que lograron evocar al momento. Con base en esto, consideramos que los supuestos de falta de integración entre las dimensiones del CC es metodológica y no ontológica.

Con nuestro trabajo pretendemos contribuir a los estudios sobre procesos de razonamiento y acciones mentales efectivas de los docentes que se puedan promover en la formación docente, sin embargo, para ahondar y mejorar la discusión es preciso señalar las dificultades epistemológicas y metodológicas que limitan los alcances de nuestras reflexiones. Estas dificultades a su vez son nuevas interrogantes con

potencial para enriquecer la discusión. Sintetizamos las que consideramos apremiantes.

Las representaciones lógico-matemáticas que los docentes podrían o no saber no se manifestaron. Esto lo atribuimos a nuestro propósito de evitar inducir el empleo de variables predeterminadas, emplear un EP semejante al origen histórico de la situación pensada por Galileo de manera cualitativa y propiciar la libre expresión de las ideas y pensamientos de los docentes. No aseveramos la imposibilidad de estudiar esta dimensión a través de un EP, y menos dada la tradición matemática para experimentar en el pensamiento. La dificultad es inherente al proceso mismo de estudiar el conocimiento de contenido (CC) docente a través de experimentos pensados, la cual deberá resolverse conforme se tenga una mejor comprensión del uso de la experimentación en el pensamiento en este tipo de investigaciones.

Otra dificultad afrontada es el acto de imaginar el fenómeno de caída libre, la agencia al experimentar en el pensamiento con dicha representación imaginada y la duda de si los profesores poseen o no mayor cantidad de información sobre la situación imaginada.

Con dificultad para imaginar el fenómeno de caída libre nos referimos a la construcción activa de dicha representación imaginaria y la riqueza de memorias activadas producto del estímulo narrativo. Es decir, la construcción para representar en la mente el fenómeno físico se lleva a cabo a partir del momento en que el experimentador -el docente- recupera de la memoria representaciones, visuales y no visuales, en cuya base hay percepciones cuasi sensoriales (Clement, 2003; Gendler, 2010; Mišćević, 1992; Nersessian, 1988, 2002). El proceso mental para recuperar las representaciones es automático dado el estímulo narrativo

y es una construcción activa del experimentador por el esfuerzo explícito que hace por recordar y pensar.

En concreto nos encontramos con la reducida diversidad de elementos recuperados por los tres participantes. Los tres docentes imaginan la caída del cuerpo pesado, ligero y el compuesto. Pero A no va más allá de imaginar esos cuerpos; B y C imaginaron una hoja de papel extendida y comprimida en bola para resaltar la forma del cuerpo como una posible causa en las diferencias de velocidad de caída; C agrega imaginar la caída de los cuerpos en el espacio para contrastar la caída en presencia y ausencia de aire.

La reducida recuperación de elementos para representar el fenómeno físico, interpretamos, es producto de la narración del EP que no suscita recobrar diversos elementos y la poca construcción activa docente. Por decir, la narración del EP plantea imaginar un cuerpo pesado, uno ligero y uno compuesto. Los docentes operan con cuerpos abstractos, incógnitos y sin forma, que no ayudan a visualizar cuerpos de diversos materiales que hubiese propiciado el análisis de la restricción galileana para cuerpos de diferente material.

En cuanto a la agencia al experimentar en el pensamiento, los reportes verbales de A, B y C no son exhaustivos en términos de analizar con detalle lo que en primera instancia viene a su pensamiento. Por ejemplo, A no estudia otras posibilidades que expliquen las causas de velocidad de caída de los cuerpos además de la gravedad; plantea la posibilidad de encontrar “otras soluciones” que “a final de cuentas” conducen a “la veracidad de Galileo”, sin embargo, no se compromete en pensar las otras soluciones. B, por su parte, finaliza diciendo “más bien

siento que sería la forma ¿no?”, pero tampoco explora los efectos en la velocidad de caída al variar la forma de los cuerpos.

La reducida recuperación de elementos para imaginar el fenómeno de la caída libre y la poca agencia de los docentes para experimentar en el pensamiento nos lleva a preguntarnos qué más saben los docentes sobre la caída libre que no se dijo. La posibilidad de CC de mayor amplitud abre la puerta para continuar la investigación y enriquecer nuestros hallazgos con base en algunos ajustes metodológicos: enriquecer la narrativa del EP como estímulo para que el experimentador recupere de la memoria una mayor cantidad de representaciones con las cuales experimentar en el pensamiento; implementar preguntas retrospectivas con la finalidad de obtener evidencia exhaustiva que revele si la amplitud de comprensión de la caída libre es mayor a la expresada en el reporte verbal. Las preguntas retrospectivas nos apoyarían a reconocer la agencia del docente al experimentar en el pensamiento y describir en qué medida se problematiza un fenómeno físico o se recuerda y enuncia un modelo teórico ideal. Podríamos obtener evidencia para saber si el profesor construye un modelo mental de caída libre al experimentar en el pensamiento o si construye un modelo mental de un modelo teórico ideal de caída libre.

7. Referencias

Blown, E. J., & Bryce, T. G. K. (2013). Thought-Experiments About Gravity in the History of Science and in Research into Children’s Thinking. *Science & Education*, 22(3), 419–481. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9548-3>

Brown, J. R. (2011). *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. Routledge.

Clement, J. J. (2003). Imagistic Simulation in Scientific Model Construction. *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 6. Recuperado de http://works.bepress.com/john_clement/10/

Corbin, J., & Strauss, A. (2014). *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. SAGE Publications.

El Skaf, R. (2018, mayo). The function and limit of Galileo's falling bodies thought experiment: Absolute weight, Specific weight and the Medium's resistance [Preprint]. Recuperado el 23 de enero de 2019, de https://www.pdcnet.org/pdc/bvdb.nsf/purchase?openform&fp=croatjphil&id=croatjphil_2018_0018_0001_0037_0058

Fischer, H. E., Borowski, A., & Tepner, O. (2012). Professional Knowledge of Science Teachers. En B. J. Fraser, K. Tobin, & C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp. 435–448). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_30

Gendler, T. (2010). *Intuition, Imagination, and Philosophical Methodology*. Oxford University Press.

Kavanagh, C., & Sneider, C. (2006a). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 21–52. <https://doi.org/10.3847/AER2006018>

Kavanagh, C., & Sneider, C. (2006b). Learning about Gravity II. Trajectories and Orbits: A Guide for Teachers and Curriculum

Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 53–102.
<https://doi.org/10.3847/AER2006019>

McConnell, T. J., Parker, J. M., & Eberhardt, J. (2013). Assessing Teachers' Science Content Knowledge: A Strategy for Assessing Depth of Understanding. *Journal of Science Teacher Education*, 24(4), 717–743. <https://doi.org/10.1007/s10972-013-9342-3>

Miščević, N. (1992). Mental models and thought experiments. *International Studies in the Philosophy of Science*, 6(3), 215–226. <https://doi.org/10.1080/02698599208573432>

Nersessian, N. J. (1988). Reasoning from Imagery and Analogy in Scientific Concept Formation. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1988, 41–47.

Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Stich, & M. Siegal (Eds.), *The Cognitive Basis of Science* (pp. 133–153). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511613517.008>

Nersessian, N. J. (2010). *Creating Scientific Concepts*. MIT Press.

SHULMAN, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14.
<https://doi.org/10.3102/0013189X015002004>

Anexo 2 Ejemplos de análisis de la Etapa 2 de investigación
PROFESOR A

“la manzana aquí cayendo [señala en el dibujo por donde caería la manzana y está ubicado la persona y silva simulando la caída de la manzana] | yo la dejaba caer y órale hasta acá [señala en su dibujo el círculo que representa la manzana] y luego si él tuviera la [...] || Porque de aquí a aquí hay una distancia enorme, pero si la vista nos permitiera ver lo que ocurriría, él observaría que aquí la manzana se detendría” (54D/229-234)

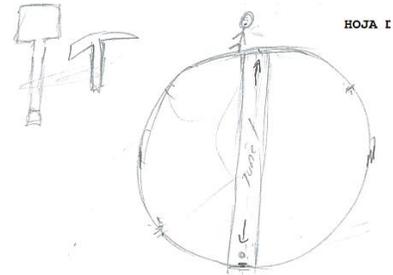


Ilustración 4 Dibujo del EP4 realizado

		Operaciones realizadas	Interpretación
Constituyentes materiales con los que se construye el escenario	<ul style="list-style-type: none"> - Túnel (derechito) - Humano - Tierra - Herramientas para hacer el túnel - Manzana - Continente/Ciudad - Video de <i>Discovery Chanel</i> 	<p><u>Recupera</u> de la memoria un video de <i>Discovery Chanel</i> sobre el túnel, en el cual se <u>traslada</u> al humano de un continente/ciudad con su antípoda. (21D/73-76)</p>	<p>El video de <i>Discovery</i> es el referente para D. El túnel es un constituyente que no actúa sobre los otros constituyentes, traslada a uno de ellos. Los constituyentes, a excepción de la gravedad, se mantienen pasivos sin efecto alguno sobre el resto de constituyentes.</p>

		Si el humano cae por el túnel la gravedad lo <u>detendría</u> , no saldría por el polo opuesto.	Contradicción con el referente. La gravedad sigue siendo el único constituyente que actúa sobre otro constituyente, en éste caso el humano
Constituyentes teóricos/conceptuales del escenario	- Gravedad - “si tú trazas un túnel desde el punto que tú quieras, el efecto [...] la idea que siempre pasa lo mismo” (51D/222-223)	“ <u>Si lo volteas al revés</u> (22D/)", el túnel, y el polo de 'salida' fuera donde el humano se dejara caer, la gravedad nuevamente <u>detendría</u> al humano, lo "frenaría" (22D)	Manipula el escenario invirtiendo los polos de 'caída' y 'salida' para argumentar en favor de su constituyente teórico/conceptual 51D/222-223. La gravedad es un constituyente de orden primario que actúa sobre el estado físico (movimiento) del constituyente 'humano' como se lee en 22D/83-84
		Imagina la manzana <u>cayendo</u> por el túnel, luego, se	Manipula el escenario modificando los puntos de 'caída' y

		<p>pregunta por qué no <u>dejarla caer de otros puntos</u> diferentes a los polos, “total que pudiéramos formar un asterisco” (51D/221-222)</p>	<p>‘salida’ para argumentar en favor de su constituyente teórico/conceptual 51D/222-223. Los constituyentes se comportan igual, pasivos, y el túnel como constituyente de ‘traslado’.</p>
		<p>La manzana <u>cae</u> hasta llegar al polo sur e inmediatamente se <u>detiene</u>. Imagina el humano como <u>observador</u> del fenómeno físico</p>	<p>La gravedad, constituyente primario, determina el estado de movimiento de la manzana, misma que es un constituyente que se traslada de un polo a otro, es decir, es un constituyente secundario que se ve afectado por un agente primario. El túnel se mantiene como constituyente de orden terciario, es decir, sin</p>

			efecto alguno sobre otros constituyentes . El observador es constituyente terciario al soltar la manzana y sólo observar sin alterar el sistema físico Se mantiene la contradicción con el referente.
--	--	--	---

Su forma de operar consiste en recuperar información de la memoria; establecer relaciones entre los constituyentes que conforman el escenario imaginado; dotar de agencia al constituyente teórico/conceptual sobre uno de los constituyentes materiales del escenario (la manzana y el humano); manipular el escenario imaginado; y reafirmar la agencia del constituyente teórico/conceptual.

Lo que el docente hizo fue seguir una serie de operaciones que conformaron una representación de un fenómeno físico en la que se evidenció la agencia primaria del constituyente teórico/conceptual; luego transformó el escenario imaginado para reafirmar la agencia primaria del constituyente teórico/conceptual.

A pesar de transformar y manipular el escenario imaginado no se puede decir que el docente esté experimentando con y en su pensamiento. En este sentido, la experimentación pensada se entiende como operar no sólo sobre el escenario imaginado y sus transformaciones, sino en explorar otro tipo de relaciones de los constituyentes materiales, así como manipular y operar sobre la agencia del constituyente teórico/conceptual, operar sobre el constituyente primario.

PROFESOR B

“el peso de la manzana siento que no cambiaría porque está dentro de la Tierra | sin embargo || podría modificarse un poco || no sé si tenga algo que ver, por la densidad tanto del polo norte | hasta llegar al polo opuesto que cambiara la densidad en ese momento de la Tierra” (D16/90-93)

“Caería en línea recta del polo norte hacia el sur || y viajaría más rápido al poder llegar al sur | y empezaría a cambiar su movimiento, sería más rápido” (D23/123-124)



Ilustración 5 Dibujo del EP4 realizado por B

		Operaciones realizadas	Interpretación
Constituyentes materiales con los que se construye el escenario	- Manzana - Túnel (horizontal/vertical) - Tierra / Polo norte y sur	<u>Relaciona</u> la manzana con el túnel, <u>proporcionan</u> do una propiedad a la manzana (trayectoria)	Directamente inicia a operar con el escenario imaginado tomando sólo los ‘elementos’ de su interés, proporcionando un constituyente teórico/conceptual a un constituyente material
Constituyentes teóricos/conceptuales del escenario	- Movimiento rectilíneo - Peso de la manzana - Densidad (del polo norte/sur terrestre) - Gravedad de la Tierra - Rapidez/Velocidad de la manzana	<u>Ubica</u> la manzana dentro del constituyente Tierra, <u>proporcionan</u> do otra propiedad a la manzana (peso)	Orienta su escenario, de manera que la Tierra es un constituyente ‘contenedor’ del constituyente manzana. Ubicar la manzana dentro de otro constituyente le dota de una propiedad

	<ul style="list-style-type: none"> - Trayectoria - Distancia - Tiempo 		descrita por un constituyente teórico/conceptual (el peso).
		<p><u>Cuestiona</u> la última propiedad de la manzana al <u>dotar</u> de agencia al constituyente teórico/conceptual densidad del polo sur terrestre</p>	<p>Detecta otra 'observación experimental' en la densidad, constituyente teórico que introduce con agencia sobre una propiedad de la manzana descrita por otro constituyente teórico (el peso). ¿La densidad tal vez la introduce por efecto del EP3?</p>
		<p><u>Deja su duda sin resolver</u> y retoma la propiedad peso del constituyente manzana <u>proporcionan</u> <u>do</u> agencia al constituyente gravedad de la Tierra</p>	<p>No se involucra activamente en explorar la acción de la densidad en el escenario. Retoma el conocimiento 'consolidado' en sus estructuras de conocimiento, el 'conocimiento seguro', en el cual el constituyente teórico/conceptual gravedad de la Tierra es el agente central del escenario</p>

			que está representando: caída de una manzana
		<u>Proporciona</u> una propiedad más a la manzana (rapidez)	El constituyente material, manzana, es dotado con una propiedad descrita por el constituyente teórico/conceptu al rapidez por efecto del constituyente gravedad
		<u>Ubica</u> la manzana entre los dos polos para <u>plantear la posibilidad de otra propiedad</u> de la manzana (cambio de trayectoria)	Nuevamente ubica un constituyente material dentro de un constituyente 'contenedor' para plantear una 'observación experimental', la idea de que (otro constituyente teórico que describe una propiedad de la manzana, trayectoria y rapidez) cambie el estado de movimiento de la manzana
		<u>Pone en duda</u> su escenario inicial (túnel)	Evalúa su escenario considerando

		horizontal) y <u>propone otro</u> escenario (túnel vertical)	cómo actuaría el constituyente material central, la manzana, para trasladarse por el constituyente 'contenedor' o 'conducto', y no identificó el constituyente teórico/conceptu al que actuaría sobre el constituyente material central
		<u>Retoma</u> información de la narración original de EP4	Al no tener 'elementos' teóricos suficientes que fundamentaran su escenario inicial los busca en la narración original
		<u>Ubica los</u> polos terrestres en el nuevo escenario y <u>proporciona</u> una propiedad a la manzana (movimiento recto)	Construye su nuevo escenario con base en la información que le proporciona la narración original sobre el constituyente 'contenedor' o 'conducto', que el túnel es vertical, y comienza a construir su nuevo escenario

		<p><u>Confirma</u> el error en su escenario inicial y <u>señala</u> el por qué un túnel horizontal: “casi siempre pues los túnel son de manera horizontal” (D46/255-256)</p>	<p>Al aún no tener un constituyente teórico que actúe sobre su constituyente material central en su escenario inicial (“cómo la tendrían que lanzar -la manzana- o con qué velocidad para que alcance a llegar hasta del otro lado” D51/287-288), B identifica una ambigüedad en su escenario inicial.</p> <p>La narración original le proporciona la solución a la ambigüedad de su escenario inicial generada por un referente experiencial: “casi siempre (...) los túnel son de manera horizontal”</p>
		<p><u>Explica</u> el primer escenario, donde <u>cuestionó</u> la propiedad del estado de movimiento de la manzana en un túnel horizontal (“cómo la tendrían que lanzar o con qué velocidad” D51/287-288), <u>postulando</u> que debería ser lanzada con mucha fuerza para que avanzara la manzana por el túnel. Allí <u>detiene</u></p>	

		<p>sus acciones de pensamiento (D51/287) y <u>vuelve a analizar</u> su escenario retomando información de la narración original del EP y <u>se da cuenta</u> de la necesidad de modificar su escenario, con un túnel vertical, <u>proporcionando</u> agencia al constituyente gravedad de la Tierra sobre el constituyente manzana</p>	
		<p><u>Retoma</u> la propiedad del constituyente manzana (rapidez)</p>	<p>Retoma los constituyentes teóricos/conceptuales que describen el constituyente manzana del primer escenario y que mantienen sentido en el nuevo escenario</p>
		<p>Se le cuestiona sobre la última</p>	<p>Introduce constituyentes teóricos/conceptuales que</p>

		<p>propiedad de la manzana y <u>responde introduciendo</u> distancia y tiempo en el escenario</p>	<p>justifiquen las propiedades teórico/conceptuales (rapidez) que dotan al constituyente material (manzana). En la intervención D50 se lee que 'B' intuye cómo justificar el aumento de rapidez en la manzana, pero sólo enuncia los términos distancia y tiempo (vinculados al constructo teórico de rapidez) pero no los explora. Los enuncia en tono interrogatorio, pero no se involucra en explorar su intuición</p>
		<p><u>Cuestiona</u> la propiedad de la distancia (¿más corta? D50/277-278) al relacionar la trayectoria de la manzana entre los polos norte y sur y <u>deja</u></p>	<p>Detecta de manera tácita, no consciente, una 'observación experimental', la idea de la distancia y el tiempo como constituyentes teóricos del escenario, pero</p>

		<u>planteado el cuestionamiento</u> sin resolverlo	no explora la agencia o rol secundario que puedan jugar en su escenario imaginado
--	--	--	---

Su proceso de operación inició con la construcción del escenario imaginado estableciendo relaciones entre los constituyentes materiales, dotándolos con propiedades y ubicándolos en el escenario; dota de agencia a un constituyente teórico/conceptual; pone en duda una propiedad de un constituyente material (la manzana); deja su duda sin respuesta dejando planteada una observación experimental; proporciona agencia a otro constituyente teórico/conceptual (la gravedad de la Tierra); por lo anterior, dota de una propiedad a la manzana (rapidez); retoma la ubicación de la manzana y plantea otra posible propiedad de la manzana; pone en duda su escenario inicial (túnel horizontal); propone otro escenario (túnel vertical); retoma información de la narración original del EP4; reconstruye su escenario ubicando nuevamente los constituyentes y mencionando sus propiedades; confirma el error en su escenario inicial explicándolo; introduce otros constituyentes teóricos/conceptuales en el escenario; cuestiona la propiedad de uno de estos últimos constituyentes; deja planteada una observación experimental sin resolverla.

En sus operaciones detecta ‘observaciones experimentales’ de manera tácita, es decir, ideas que se podrían explorar, pero no se involucra de manera activa en pensarlas, reflexionarlas, experimentar con ellas en su escenario imaginado. Esas ideas, por ejemplo con la densidad y su relación con el peso, considera que puede existir alguna relación, pero en lugar de involucrarse con la idea, la descarta con un “no sé”. Es decir, se trata de una idea que vincula dos esquemas de conocimientos, densidad y gravedad, una intuición de la profesora, pero al no conocer cómo se relacionan abandona la idea y no explora su intuición. En cambio, retoma los ‘conocimientos fijos’ en sus esquemas de conocimientos ya consolidados para representar un fenómeno físico en un escenario imaginado: una manzana cayendo por un túnel que atraviesa la Tierra de polo a polo.

Sus intuiciones no son físicas, son teórico/conceptuales. Intuye relaciones proposicionales entre diferentes constructos teóricos/conceptuales pero no las demuestra.

**Anexo 3 Ejemplos de análisis Fase final de investigación
Modelo mental EP1_DA**

	Cita	Nº Cita	Segmento del reporte verbal
Información proposicional amodal	según recuerdo puede que me equivoque según recuerdo cuando te estás moviendo en caída libre que sería el caso de la manzana puede aparentar que no tiene peso hipotéticamente hablando ¿verdad?	1	<i>Think aloud</i>
	creo que dentro de la Tierra ocurre un fenómeno interesante con la cuestión de la caída	2	
	pero creo que dentro de lo que era si podemos hablar de la parte central de la Tierra creo que se puede ¿cómo podría decirlo? manifestar un aspecto como de ausencia gravitacional	3	
	pero pensaría que el peso al menos la cuestión del peso de la manzana podría hasta cierto punto despreciarse	4	
	y estamos considerando la aceleración como la consecuencia de la curvatura	5	
Información icónica modal y amodal	entonces hay un túnel	6	
	entonces estamos hablando de que la manzana va a estar atravesando el túnel de extremo a extremo	7	

	uno pensaría que la manzana va a estar cayendo al llegar a un extremo se regresa al llegar a otro se regresa	8	
	no quiero decir que se acople tanto a un movimiento de vaivén sino a que en algún punto podría existir algún tipo de suspensión de la manzana	9	
Transformación de la información	entonces no puede ser que se quede suspendida como tal	10	
	estarías en el centro de la curva al pasar por el centro de la Tierra ¿quién sabe? es lo que trato de pensar básicamente	11	
	no sé es todo lo que trato de pensar	12	
Entidades teóricas	porque a final de cuentas es debido a la aceleración gravitacional	13	

	Cita	N° Cita	Segmento del reporte verbal
Información proposicional amodal	Entrevistador: ¿cuál sería tu conclusión en relación al movimiento y peso de la manzana? Docente: en la caída libre considero que la manzana podría aparentar que no tiene peso o sea básicamente considero que al momento sería uniformemente acelerado de extremo a extremo	14	Entrevista retrospectiva

	según recuerdo en una cosa que leí hace mucho cuando llegas al interior de la Tierra hipotéticamente manifiestas ausencia de gravedad entonces se supone que la aceleración gravitacional en algún punto debe tender a cero	15	
	en esa creo que era conferencia habían mencionado dentro del cuerpo aparentemente el campo gravitacional desaparecería momentáneamente de igual forma si tú te estás moviendo de forma acelerada puedes manifestar sobre todo en caída libre puedes manifestar una ausencia de gravedad	16	
	la gravedad como tal no es una fuerza es una aceleración en este caso entonces la consecuencia de la aceleración sería el peso	17	
		18	
Información icónica modal y amodal	Pues trato de imaginármelo como podría observarse suponiendo que tuviéramos por ejemplo un túnel a través de la Tierra ¿verdad? Y es que si consideramos por ejemplo la cuestión de un hiperboloide si yo dejara [...] imagínate que tengo un	19	

	<p>hiperboloide en el cual tú vas a sumergirte (???) arriba y abajo si deajo caer por allí algo</p>		
	<p>siento que para la manzana cayendo sí podrías percibir esa curvatura que nosotros no detectamos a simple vista</p>	20	
	<p>tenemos estos dos tipos como de cavidades una cóncava otra convexa suponiendo que este es el túnel que cava esta persona y deja caer la manzana aquí la posición en este caso sería relativa porque si la persona está aquí esta parte para él sería arriba pero si la persona está acá esta parte para ella sería arriba entonces la manzana debería no podemos decir que siente porque pues no pero podría manifestar o presenciar ese mismo efecto cuando la manzana esté aquí y se deje caer pues acá va a llegar a un punto aquí y cuando llegue acá pues básicamente volverá estar arriba pero en el otro punto</p>	21	
	<p> en primer instante uno cuando dice un hoyo de polo a polo dices ¡ah pues! Convencionalmente sé que eso</p>	22	

	<p>no se puede hacer o sea causas cierto conflicto para salirme de la idea y eso ya sería una primera parte del problema</p>		
	<p>si tengo la Tierra aquí <<D indica un dibujo en su hoja de trabajo>> y está atravesada de polo a polo en algún punto se debe sentir esa curvatura es como por ejemplo cuando jugábamos canicas si yo tiraba la canica al hoyo allí se quedaba pero aquí no va a ocurrir eso porque te digo la perspectiva de arriba y abajo entonces en algún punto algo le debe ocurrir a la manzana no sé realmente qué</p>	23	
	<p>por esta cuestión de la curvatura de allí de la Tierra pienso que algún efecto debería sufrir la manzana por eso te digo no se si se quede suspendida si algo le pasara rotara no sé</p>	24	
	<p>planteaban de que por ejemplo si querías [...] partía de los elevadores o sea cuando vas en los elevadores tu peso cambia puede aumentar puede disminuir según hacia a</p>	25	

	donde te estés moviendo entonces algo así le debe ocurrir a la manzana	
	Más que nada si te fijas tuve que dibujarlo no lo dibujé en principio pero en mi cabeza sí lo estaba tratando de dibujar me imaginé como en las caricaturas de que dibujabas un túnel y aparecerían en China entonces dije ¡bueno! si atravieso un túnel aparezco como en las caricaturas en otro país en otro continente al momento que llegue allá ¿voy a estar de cabeza como en las caricaturas? Dije ¡no! va a cambiar mi percepción de arriba y abajo entonces siguiendo eso lógica de <i>Bugs Bunny</i> y esas cosas pues traté de imaginar que la manzana sufriera el mismo efecto	26
	sería como si estuviéramos jugando en una rampa como la manzana va a llevar la suficiente va a adquirir la suficiente energía para bajar estaría haciendo como este vaivén algo similar como una rampa o sea de aquí para allá	27
	pensé en la posibilidad en algún momento de que la manzana pudiese	28

	<p>abandonar pero dije no va a tener la velocidad de escape o la energía necesaria para escapar de esto entonces imaginemos que va a estar atorada como en una rampa y va a estar haciendo un movimiento de vaivén como un tipo de péndulo que va a estar sujeta a un hilo invisible</p>		
	<p>yo lo imaginé como un sistema estático</p>	29	
Transformación de la información	<p>trato de llegar a una idea pero no logro expresarla entonces yo creo que así nos quedamos</p>	30	
	<p>considero que al momento sería uniformemente acelerado de extremo a extremo sería lo que trato de concluir</p>	31	
	<p>Y es que si consideramos por ejemplo la cuestión de un hiperboloide si yo dejara [...] imagínate que tengo un hiperboloide en el cual tú vas a sumergirte (9:02) arriba y abajo si dejo caer por allí algo cuando llegue a lo que para mí es arriba cuando la pelota llega al otro lado para esa pelota va ser arriba y va estar regresando regresando </p>	32	

	entonces es lo que me ocurrió pues no sé si sea adecuado o no	33	
	¿Te lo dibujo? y te lo voy describiendo	34	
	pero te decía como que siento que aquí ocurriría algo porque estarías llegando al centro o al punto intermedio de la curvatura por decirlo	35	
	en primer instante uno cuando dice un hoyo de polo a polo dices ¡ah pues! Convencionalmente sé que eso no se puede hacer o sea causas cierto conflicto para salirme de la idea y eso ya sería una primera parte del problema	36	
	pero es hipotético imagínate que sí se puede yo trato de problematizar yo pienso que aquí trata de ver comprender el concepto de peso el concepto de movimiento una situación en la cual estamos refiriendo que es de polo a polo	37	
	cuando jugábamos canicas si yo tiraba la canica al hoyo allí se quedaba pero aquí no va a ocurrir eso porque te digo la perspectiva de arriba y abajo entonces en algún	38	

	punto algo le debe ocurrir a la manzana no sé realmente qué		
	algún efecto debería sufrir la manzana por eso te digo no se si se quede suspendida si algo le pasara rotara no sé Entrevistador: ¿Algo? Docene: Algo pero no sé explicarlo	39	
	siguiendo eso lógica de <i>Bugs Bunny</i> y esas cosas pues traté de imaginar que la manzana sufriera el mismo efecto	40	
	a ver ¿cómo lo podríamos plantear? yo pienso que va a estar sujeta sería como si estuviéramos jugando en una rampa como la manzana va a llevar la suficiente va a adquirir la suficiente energía para bajar estaría haciendo como este vaivén algo similar como una rampa o sea de aquí para allá <<D señala un movimiento de vaivén en el túnel de su dibujo>>	41	
Entidades teóricas	y así se me ocurre a partir de que se sabe que la gravedad es una consecuencia de la curvatura	42	
	la gravedad como tal no es una fuerza es una aceleración en este	43	

	caso entonces la consecuencia de la aceleración sería el peso		
	en algún punto debe desaparecer el campo gravitacional pero realmente no recuerdo	44	
	Entrevistador: Aludías a que la manzana dentro del túnel llegaría al otro extremo y como es arriba otra vez volvería a regresarse, ¿qué es lo que hace que esa manzana se regrese una y otra vez? Docente: Sería la curvatura Entrevistador: ¿La curvatura? Docente: La curvatura debido a la presencia de la masa en el espacio es lo que yo trato de pensar quién sabe	45	

El modelo se puede identificar como: La manzana tendrá movimiento perpetuo en caída libre con aceleración uniforme.

Por la información icónica y proposicional expresa por A se sabe que su referente es el principio de equivalencia entre aceleración y un campo gravitacional. Pero también aparecen otros referentes (el péndulo, el hiperboloide, la rampa, los túneles de caricaturas) con los cuales transforma el escenario y predice el comportamiento del movimiento de caída de la manzana. Con el hiperboloide y el ejemplo de los dibujos animados enmarca que la manzana siempre estará cayendo en una especie de vaivén. La rampa y el péndulo son sistemas análogos en los cuales el móvil en caída no posee energía necesaria para escapar de ellos, por lo cual se justifica el movimiento en vaivén; sin embargo, en el péndulo, en la rampa (la curva de las canicas), en el centro de la curva “ocurre algo”, se detienen los objetos, y esto se toma como indicador de

que 'algo' debe ocurrir en el centro de la curva que genera el campo gravitacional terrestre, y ese 'algo' debe afectar a la manzana de alguna manera.

¿Qué hace con esas representaciones y escenarios análogos? Lo que hace con las representaciones puestas en acción es transformar el escenario en otro escenario análogo, pero eso limita el pensamiento a no buscar y explorar relaciones causales y restricciones teóricas en esos sistemas análogos; los referentes sólo son simulaciones análogas. También, esas representaciones análogas, como el juego de las canicas, indican que 'algo' podría ocurrir con la manzana en el centro de la Tierra al igual que las canicas se detienen en el centro de masa del hoyo a donde son arrojadas.

Las representaciones análogas solo ayudan a cuasi observar cómo se comportaría el sistema físico, y a identificar un problema, pero no se utilizan para resolver el problema. Las representaciones proposicionales no se problematizan, enmarcan lo observado. Con la información icónica se localizan los diversos objetos físicos imaginados; por ejemplo EP1TADA21.