



EDITORIAL DE LA
UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
NACIONAL (UTN)



La Segunda Ley de la Termodinámica y el concepto de Entropía en estudiantes universitarios.

Simulaciones como puentes cognitivos entre los modelos espontáneos y los científicos.

Ing. Juan Alberto Farina

*Tesis presentada para optar al título de
Magíster en Docencia Universitaria de la
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Rosario*

Directora de Tesis: Dra. Graciela Utges

Rosario, 2014

ISBN 978-987-1896-58-5

©[Copyright]

edUTecNe, la Editorial de la U.T.N., recuerda que las obras publicadas en su sitio web son de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir la producción cultural y el conocimiento generados por autores universitarios o auspiciados por las universidades, pero que estos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.

La Segunda Ley de la Termodinámica y el concepto de
Entropía en estudiantes universitarios

Autor: FARINA, Juan

ISBN 978-987-1896-58-5

La Segunda Ley de la Termodinámica y el concepto de Entropía en estudiantes universitarios. Simulaciones como puentes cognitivos entre los modelos espontáneos y los científicos.

Resumen

El presente trabajo se inscribe dentro del campo de investigación en Didáctica de las Ciencias, abordando la búsqueda de alternativas didácticas que contribuyan a superar dificultades de comprensión de estudiantes de nivel universitario básico en un tema que no ha sido suficientemente explorado: el concepto de entropía.

Adoptamos la metodología propuesta en Ingeniería Didáctica (Artigue, 1989, 2011), complementada con criterios asociados a la noción de Idoneidad Didáctica (Godino, Contreras y Font, 2006; Godino, Bencomo, Font y Wilhelmi, 2007), para diseñar y evaluar un dispositivo didáctico destinado a la enseñanza del concepto mencionado. Dicho dispositivo, basado en simulaciones, aborda la entropía desde una perspectiva microscópica.

Palabras clave:

Entropía-Ingeniería didáctica-Simulaciones- Idoneidad didáctica

The Second Law of Thermodynamics and Entropy concept in college students. Simulations as cognitive bridges between spontaneous and scientific models.

Abstract

This work is part of the research area in Science Teaching, addressing the search for educational alternatives to help overcome difficulties in understanding basic college-level students in a subject that has not been sufficiently explored: the concept of entropy.

We adopt the proposed methodology in Teaching Engineering (Artigue, 1989, 2011), supplemented with criteria associated with the notion of Didactic Suitability (Godino, Contreras y Font, 2006; Godino, Bencomo, Font y Wilhelmi, 2007), to design and evaluate a teaching device for teaching the concept mentioned. Said device, based on simulations, entropy addresses from a microscopic perspective.

Keywords:

Entropy - Didactic Engineering - Simulations- Teaching Suitability

Para

Mecha, Seba , Mauri y Juan Pablo que está por nacer

Agradecimientos

Es para mí muy grato poder expresar agradecimiento a todas las personas que me han apoyado tan desinteresadamente durante todo el tiempo que duró el trabajo de Tesis y me han sostenido anímicamente para poder terminarlo.

Quiero agradecer profundamente a mi directora de Tesis, la Dra. Graciela Utges porque con su presencia incondicional, cuidadosa y crítica supervisión y sus relevantes aportes, comentarios, críticas y sugerencias durante todo el desarrollo de esta investigación me ha guiado hasta lograr terminarla.

Agradezco enormemente a mis compañeros del grupo de investigación tanto de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR; de la Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional Rosario) y del Instituto Politécnico Superior “Gral. San Martín” por su valioso apoyo y comprensión.

Un agradecimiento especial a mi amigo Alberto Jardón quien me brindó todo su apoyo incondicional, por permitirme ingresar a observar sus clases, grabarlas, filmarlas y desmenuzarlas y por estar siempre presente con mis tristezas, mis alegrías y desesperanzas, por la enorme cantidad de artículos de investigación, bibliografía y por sobre todo sus consejos y las largas charlas epistemológicas sobre termodinámica, cerveza de por medio en la terraza de su casa en los cálidos atardeceres de verano rosarinos. No puedo dejar de mencionar a su esposa, Dra. Isabel Fernandez Acevedo que siempre me brindó sinceras palabras de aliento.

Agradezco también a Roberto Laura, por haberme permitido ingresar a sus clases y a compartir charlas “entrópicas” en la casa de Cheli, sábados por la mañana entre mate y facturas, discutiendo fervorosamente sobre termodinámica.

Agradezco también a mi familia: mis hijos Sebastián y Mauricio por su paciencia y respaldo y también a mi esposa Mercedes por el aguante, su infinita paciencia y los tiempos no compartidos.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos, a Jacobo Sitt, a Carola Graziosi, a Sonia Concari quienes confiaron en mí y quienes en el debido momento me motivaron para superar las dificultades que se me presentaron en el transcurso de mis largos momentos de dedicación a este trabajo y por los inolvidables viajes y momentos compartidos en las Olimpíadas.

Índice

CONTENIDO	PÁGINA
Presentación	1
Intención básica de esta investigación	1
Justificación del trabajo	2
Preguntas iniciales y objetivos de esta investigación	3
Este documento	3
Capítulo 1 : Marco Teórico-Metodológico	5
1.1 La didáctica como ciencia del diseño	5
1.1.1 La perspectiva anglosajona	6
1.1.2 La perspectiva francesa- Ingeniería didáctica	7
1.2 La noción de idoneidad didáctica como herramienta para el análisis	9
1.3 Elementos para el análisis. Objeto y significado en la perspectiva ontosemiótica	11
1.3.1 La noción de objeto	11
1.3.2 La concepción de significado	13
1.3.3 Elementos del significado	14
1.3.4 La relatividad de los significados: Institucionales y personales	15
1.4 El marco teórico metodológico adoptado y sus aportes para el desarrollo de la tesis	17
Capítulo 2: Análisis Preliminar-Significado de la entropía	19
2.1 Significado institucional. Análisis histórico	20
2.1.1 De Carnot a Clausius. La perspectiva clásica	20
2.1.2 Maxwell y Boltzmann. La perspectiva microscópica	27
2.1.3 Controversias entre energetismo y atomismo	31
2.1.4 Planck y Gibbs. La profundización de los paradigmas	32
2.1.5 Carathéodory. La perspectiva axiomática	34
2.1.6 Otras perspectivas	37
2.2 Significado Institucional. Análisis de textos	37
2.2.1 Enfoque clásico	38
2.2.2 Enfoque microscópico	39
2.2.3 Enfoque axiomático	42
2.2.4 Comparación de las presentaciones	44
2.3 Significado institucional local. Análisis del contexto	47
2.3.1 Análisis del libro de texto	47
2.3.2 Análisis de las clases	48
2.3.3 Entropía en el contexto local	51
2.4 Significados personales. Concepciones de los estudiantes	53
2.4.1 Investigaciones sobre los significados personales	54
2.4.2 Síntesis de las concepciones y potenciales dificultades en el contexto local	60

Capítulo 3: Análisis Preliminar- Simulaciones	63
3.1 Simulaciones en la enseñanza de la física	63
3.2 Simulaciones. Entropía desde una perspectiva microscópica	68
3.2.1 Molecular Workbench	69
3.2.2 Physics Education Technology Project	71
3.2.3 Processi Termici ed Entropía	72
3.2.4 Statistical Interpretation of Entropy	75
3.2.5 Statistical and Thermal Physics	77
3.2.6 Experimentos Interactivos en Sistemas Físicos Complejos	78
3.3 Implicaciones del análisis para abordar nuestra experiencia	79
 Capítulo 4: Puesta en marcha de la experiencia	 81
4.1 El contexto de la experiencia: La actividad propuesta	81
4.2 Los applets utilizados	82
4.3 Análisis a priori del dispositivo implementado	83
4.3.1 Urna de Boltzmann	85
4.3.2 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el Equilibrio	88
4.3.3 Tirada de Monedas	90
4.3.4 Multiplicidad	94
4.4 Hipótesis preliminares sobre la idoneidad didáctica del dispositivo	97
 Capítulo 5: Análisis a posteriori	 99
5.1 Análisis a posteriori. Logros y dificultades de los estudiantes	100
5.1.1 Urna de Boltzmann	100
5.1.2 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el Equilibrio	101
5.1.3 Tirada de Monedas	103
5.1.4 Multiplicidad	106
5.2 Análisis a posteriori. Nociones alternativas de equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad	107
5.3 Análisis a posteriori. Idoneidad didáctica del dispositivo	112
 Reflexiones Finales	 119
A modo de síntesis	119
A modo de conclusión	120
 Referencias Bibliográficas	 123

ANEXOS

Anexo A: Trabajo Práctico. Guía de Actividades

Anexo B: Respuestas de los Estudiantes.

Anexo C: Guía de Actividades Reformulada

El presente trabajo de tesis tiene su origen en motivaciones personales relacionadas con dificultades que he encontrado al enseñar la noción de entropía en el nivel universitario básico. El propósito de esta presentación es comentar cuáles han sido las inquietudes que me llevaron a investigar sobre ese tópico particular de la física, en un contexto particular y utilizando simulaciones como herramienta didáctica. Se mencionan también el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación y una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos que componen este documento.

INTENCIÓN BÁSICA DE ESTA INVESTIGACIÓN

El propósito general de esta tesis es investigar en qué medida la utilización de simulaciones puede contribuir a una mejor comprensión del concepto de entropía, por parte de estudiantes universitarios, en un contexto en que dicho concepto es enseñado desde una perspectiva microscópica.

Dos razones fundamentales fueron el motor que me llevó a investigar sobre el tema planteado. Por un lado, las dificultades con que me he enfrentado personalmente para encontrar un modo adecuado de enseñar el concepto de entropía de manera plausible para los estudiantes, y por otro, mi interés por incorporar de manera efectiva las simulaciones en mis clases.

El trabajo realizado puede ubicarse, en general, en el marco de la investigación educativa en ciencias. La investigación en enseñanza-aprendizaje en esta área se ha constituido en los últimos años en un campo fructífero con connotaciones propias, que se nutre de diversas disciplinas científicas, entre ellas la Psicología Cognitiva, las Ciencias de la Educación, la Lingüística, la Epistemología e Historia de las Ciencias, y por supuesto, las ciencias de cuya enseñanza se ocupa, la física, la química o la biología.

Se trata de una investigación cualitativa, en la cual se implementa una experiencia de innovación educativa realizada en un curso de física básica para carreras de ingeniería donde, desde hace años, se desarrolla termodinámica desde una perspectiva microscópica. La expectativa era complementar las clases teóricas y prácticas que se venían realizando tradicionalmente en la asignatura con actividades innovadoras, que incorporaran simulaciones para lograr una mejor comprensión por parte de los estudiantes del concepto de entropía.

La experiencia fue realizada en la asignatura Física II, de las carreras de ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario (FCEIA-UNR). Mi proximidad con docentes de la cátedra brindó la posibilidad de llevarla adelante. Se acordó con ellos adoptar una modalidad de trabajo que no colisionara con el desarrollo habitual de las clases.

Para el diseño, implementación y análisis de la experiencia, adoptamos la metodología propuesta por Michèle Artigue (Artigue, 1989), en el marco de la denominada ingeniería didáctica, complementada con la adopción de los criterios para la evaluación de la idoneidad didáctica de dispositivos de enseñanza formulados por Juan Godino y su grupo (Godino, 2002; Godino, Batanero y Font, 2007).

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Entropía es un concepto central, tanto en física como en química. La entropía es un indicativo del sentido de las reacciones químicas; permite deducir y evaluar de qué manera los procesos espontáneos harán evolucionar un sistema desde un estado a otro. Aporta una respuesta sobre cómo los estados vivos, aparentemente en situación de no equilibrio, pueden mantenerse en ese estado. Se trata no obstante de una noción compleja, difícil de explicar e interpretar significativamente.

Mi experiencia personal, y la de muchos colegas consultados, indica que los estudiantes universitarios y muchos profesores de ciencias muestran dificultades considerables en su comprensión significativa, y que la enseñanza tradicional del concepto resulta poco efectiva.

Generalmente, la entropía es presentada en los cursos básicos universitarios, desde una perspectiva clásica, sea porque esa es la que han recibido los docentes en su formación o porque es la que reproducen la mayoría de los libros de texto.

Como detallan Tarsitani y Vicentini (1996), los libros de texto basados en el enfoque clásico desarrollan el concepto de Entropía a partir de la visión de Clausius, con particular atención en los aspectos fenomenológicos de los procesos térmicos y el rendimiento de las máquinas térmicas. Esta es precisamente la perspectiva utilizada en el clásico libro de Zemansky (1970), que reconoce como antecedentes los textos de Maxwell y de Planck de fines del siglo XIX, y que ha impregnado a autores posteriores, marcando un camino para la enseñanza del concepto.

Esa perspectiva, que se apoya en el análisis de las máquinas térmicas puede ser vista como muy relevante en carreras técnicas, como por ejemplo en ingeniería, dada su utilidad para realizar cálculos concretos. Sin embargo, la típica formulación de la entropía a partir del teorema de Clausius es percibida por los estudiantes como una formulación matemática sin significado claro y preciso. Muchos autores coinciden con esta apreciación. Así, García Colin (1983) destaca, por ejemplo, que en su larga trayectoria docente en la enseñanza de la termodinámica, ha observado que muy poca gente logra que los estudiantes capten con claridad el concepto de entropía.

La manera clásica de definir este concepto central de la Termodinámica, si bien se organiza a partir de una elegante formulación matemática, acarrea el problema de no aportar demasiado a la comprensión de la entropía desde el punto de vista físico. La expresión clásica, en términos de $\delta Q/T$ permite realizar cálculos relevantes, pero su significado permanece, en general, oscuro y opaco para los estudiantes, e incluso para muchos profesores. Frente a las dificultades de comprensión conceptual que acarrea la perspectiva clásica, surgen voces que plantean la conveniencia de enseñar el concepto desde una perspectiva microscópica. Vale citar autores como William Reynolds (1967), Charles Kittel (1973), Frederick Reif (1969) y Bernard Jancovici (1997) quienes, entre otros, sugieren que la perspectiva microscópica podría ofrecer mayores ventajas para la interpretación de la entropía y proponen introducirla a partir de la formulación de Boltzmann tomando como base la noción de multiplicidad de estados.

Si bien coincidimos con las apreciaciones anteriores, advertimos que un enfoque de la enseñanza del concepto de entropía planteada desde la formulación de Boltzmann tampoco está exento de problemas, y requiere de la elaboración de situaciones didácticas adecuadas para lograr una apropiación significativa por parte de los estudiantes. Particularmente, hay que tener en cuenta que la misma involucra modelos especiales y consideraciones de probabilidades y estadística que no siempre los estudiantes comprenden acabadamente. De hecho, si bien son pocas las investigaciones que abordan las dificultades de los estudiantes en la comprensión microscópica de la entropía, estas coinciden, como veremos más adelante, en afirmar que conceptos como macroestado, microestado o multiplicidad no siempre son

debidamente interpretados. Se requiere entonces de mayor investigación en ese aspecto, así como en el desarrollo y análisis de modalidades didácticas que contribuyan a una apropiada presentación del tema. En ese sentido, consideramos que la utilización de simulaciones que se orienten a lograr una buena interpretación de los conceptos antes mencionados podría ser de gran utilidad, habida cuenta de los numerosos trabajos que destacan que estas herramientas pueden contribuir significativamente a la comprensión conceptual si se las utiliza adecuadamente (Utges, Fernandez y Jardon, 2011).

Y en este último aspecto es que centramos el foco de nuestro trabajo. Nos interesa explorar en qué medida pueden ser utilizadas determinadas simulaciones para lograr una mejor comprensión de entropía y los conceptos relacionados con ella desde la perspectiva microscópica.

PREGUNTAS INICIALES Y OBJETIVOS DE ESTA INVESTIGACIÓN

En función de la problemática señalada anteriormente, nos planteamos preliminarmente algunas preguntas, que orientaron el trabajo realizado.

- 1- ¿Pueden las simulaciones contribuir a una mejora en el aprendizaje de la entropía?
- 2-¿Qué simulaciones y articuladas de qué modo podrían ayudar a la comprensión del concepto de entropía desde el punto de vista microscópico?
- 3-¿De qué modo podrían incorporarse alternativas didácticas basadas en simulaciones en un contexto tradicional de enseñanza en el sentido de teoría, práctica y laboratorio?

Esas preguntas iniciales fueron el motor que impulsó esta investigación, para la cual se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar la potencialidad de un dispositivo didáctico basado en simulaciones por computadora para el aprendizaje conceptual de la noción de entropía en el nivel universitario básico de carreras científico –tecnológicas, desde una perspectiva microscópica.

Objetivos específicos

- Diseñar, implementar y evaluar una alternativa didáctica basada en simulaciones por computadora para la enseñanza de la entropía desde una perspectiva microscópica.
- Analizar en profundidad la potencialidad de las simulaciones utilizadas para resolver las dificultades de comprensión de los estudiantes.
- Reformular y ajustar la alternativa implementada contemplando el análisis realizado.

ESTE DOCUMENTO

Este documento da cuenta de la investigación realizada y se encuentra organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1: Marco Teórico-Metodológico

En este capítulo se presenta el marco teórico-metodológico que ha guiado la investigación y se reformulan las preguntas iniciales en función de dicho marco.

Capítulo 2: El significado de la entropía

Se presenta un análisis del significado del objeto entropía, en sus tres vertientes: institucional, local y personal.

Capítulo 3: Simulaciones

Se discute el papel epistemológico y didáctico de las simulaciones y se analizan simulaciones sobre entropía disponibles en diversos sitios web.

Capítulo 4: Puesta en marcha de la experiencia

Se describe en este capítulo la actividad propuesta y el contexto de la experiencia. Se describen las simulaciones utilizadas y se presenta el análisis realizado a priori sobre potencialidad del dispositivo didáctico diseñado.

Capítulo 5: Análisis a posteriori

Se presenta el análisis a posteriori, realizado en base al conjunto de datos recogidos a lo largo de la experiencia realizada. En la confrontación del análisis a priori y el análisis a posteriori, se fundamenta la validación de las hipótesis formuladas en la investigación.

Reflexiones finales

Índice

1.1 La didáctica como ciencia del diseño

1.1.1 La perspectiva Anglosajona

1.1.2 La perspectiva Francesa. Ingeniería didáctica

1.2 La noción de Idoneidad didáctica como herramienta para el análisis

1.3 Elementos para el análisis. Objeto y Significado en la perspectiva ontosemiótica

1.3.1 La noción de objeto

1.3.2 La concepción de significado

1.3.3 Elementos del significado

1.3.4 La relatividad de los significados: Institucionales y personales

1.4 El marco teórico metodológico adoptado y sus aportes para el desarrollo de la tesis

1.1 LA DIDÁCTICA COMO CIENCIA DEL DISEÑO

Desde hace décadas, varios autores, tanto de la escuela anglosajona como de la escuela francesa, proponen pensar la didáctica como “ciencia del diseño”.

Pensar la didáctica como ciencia del diseño implica, de alguna manera, compararla con la formación y competencias propias de un ingeniero. Esta postura considera que la didáctica no puede estar ajena a la tarea de formular preguntas significativas y hallar respuestas adecuadas para resolver situaciones problemáticas vinculadas a los procesos de enseñanza y aprendizaje.

El desempeño profesional de un ingeniero abarca diversas funciones: desarrollo, diseño, planificación, organización, construcción, instalación, operación, evaluación y control. Si pensamos en las especificidades que el ingeniero debe abordar en su profesión, podríamos decir que la didáctica, pensada de ese modo, debería esforzarse por desplegar funciones vinculadas al desarrollo de estrategias eficaces y de nuevas herramientas y modalidades de enseñanza.

El desarrollo de dichas funciones implica la consideración de diferentes procesos, tales como identificación de problemas, búsqueda y procesamiento de información actualizada y confiable, establecimiento de criterios, consideración de alternativas, análisis y resolución de problemas, toma de decisiones, comunicación (Schön, 1992) .

La resolución de problemas requiere del conocimiento adecuado, el juicio apropiado y el sentido ético para reducir el problema real, en general complejo, a uno en el cual el conocimiento científico y práctico puedan ser aplicados para solucionarlo. Pero la habilidad para resolver problemas es resultado también de la experiencia, que se logra básicamente con un entrenamiento en la resolución de cuestiones reales. Schön (1992) hablaba de un arte de definición del problema, de un arte de su puesta en práctica y de un arte de la improvisación.

En términos de competencias, paradigma tan en boga últimamente en el campo de la

formación profesional (CONFEDI, 2004), se pueden identificar varios rasgos característicos en los ingenieros, relacionados con la capacidad de modelar fenómenos y procesos; resolver problemas de ingeniería; comunicarse competentemente de manera oral y escrita; ser capaz de diseñar, administrar, gestionar y evaluar proyectos relacionados con la ingeniería y la tecnología; habilidad para trabajar en grupos multidisciplinarios; capacidad para aprender y desarrollar actividades experimentales; disposición a adaptarse a nuevas situaciones; creatividad; aptitud y habilidad para la investigación; adquirir destrezas computacionales, entre otras; y todo lo anterior, cimentado sobre arraigados principios éticos (Torrado, 1998; Wolansky y Lozeco, 2005).

Enlazar estos aspectos con el campo profesional de la didáctica, implica poner el acento en el modelado de dispositivos de enseñanza, en el diseño de estrategias, en la puesta en marcha y experimentación de alternativas, utilizando recursos e instrumentos disponibles con creatividad, científicidad y ética.

Las perspectivas que piensan la didáctica poniendo el foco en el diseño de dispositivos de enseñanza inician su desarrollo en los años 80 y reconocen dos líneas de investigación que tienen muchos puntos en común, aunque han avanzado de manera independiente. Una línea, cuyos referentes principales son Ann Brown (1992) y Alan Collins (1992), responde a la tradición anglosajona. La otra es la visión francesa, cuya principal exponente es Michelle Artigue (1989,1990, 1995, 1998), que ha desarrollado el constructo de ingeniería didáctica.

1.1.1 La perspectiva anglosajona

La visión actual anglosajona en enseñanza de las ciencias muestra particular interés por las investigaciones basadas en el diseño. Al respecto, en el campo de la didáctica de la matemática, autores de reconocido prestigio han desarrollado propuestas metodológicas que fundamentan teórica y metodológicamente esa perspectiva (Collins, Joseph y Bielaczyc, 2004; Kelly, Lesh y Baek, 2008; Brown, 1992).

Los autores mencionados utilizan la expresión “design-based research methods”, destacando cinco características de esa aproximación:

- 1 Los fines centrales del diseño de entornos de aprendizaje, y el desarrollo de teorías o "proto-teorías" del aprendizaje, están entrelazados.
- 2 El desarrollo y la investigación tienen lugar mediante ciclos continuos de diseño, implementación y análisis.
- 3 La investigación basada en diseño debe conducir a teorías que puedan ser compartidas con los profesores y los diseñadores de currículo, para comunicarles implicaciones relevantes.
- 4 La investigación debe explicar cómo funcionan los diseños en entornos reales. No solo debe documentar el éxito o fracaso, sino también informar sobre interacciones que refinan nuestra comprensión de las cuestiones de aprendizaje implicadas.
- 5 El desarrollo de tales implementaciones debe basarse en métodos que se puedan documentar y que permitan conectar los procesos de intervención con los resultados de interés.

Como señalan Collins, Joseph y Bielaczyc (2004), el enfoque de experimentos de diseño incorporan dos elementos clave para guiarnos en la mejora de la práctica educativa: el foco en el diseño y la evaluación de sus elementos críticos.

Cobb y Gravemeijer (2008) sostienen que en un experimento de diseño deben considerarse tres fases: 1) Preparación del experimento; 2) Experimentación para apoyar el aprendizaje; 3) Análisis retrospectivos de los datos generados durante la realización del experimento. Una descripción somera de cada una de estas etapas es la siguiente:

Fase 1: Preparación del experimento

Es la fase previa al experimento, en la que hay que considerar cuatro aspectos, según Cobb y Gravemeijer: clarificar los fines instruccionales; documentar los puntos instruccionales iniciales; delimitar una trayectoria del aprendizaje previsto y situar el experimento en un contexto teórico.

Fase 2: Experimentación (implementación o puesta en práctica)

Esta fase tiene como objetivo la mejora mediante contraste y revisión de conjeturas sobre el proceso de aprendizaje previsto y los medios específicos para apoyarlo. Tiene en cuenta varios aspectos: recogida de datos; marcos interpretativos; ciclos de diseño y análisis; teorías instruccionales del dominio (o contenido específico).

Fase 3: Realización de análisis retrospectivos

Sitúa el aprendizaje y los medios mediante los cuales fue apoyado, en un contexto teórico más amplio y se realiza sobre los siguientes aspectos del experimento: gramática argumentativa; confiabilidad; repetibilidad o reproducibilidad y generalizabilidad.

1.1.2 La perspectiva francesa -Ingeniería didáctica

En Francia, una perspectiva basada en el diseño, denominada Ingeniería Didáctica fue desarrollada por Michèle Artigue. Según la autora, su motivación surgió de la necesidad de abordar de manera adecuada dos cuestiones importantes:

- Las relaciones entre investigación y acción en un sistema de enseñanza.
- El papel de las “realizaciones didácticas” en el aula, dentro de las metodologías de la investigación en didáctica.

El término acuñado para referirse a este tipo de investigación hace referencia a lo antes expresado en cuanto a su analogía con el trabajo de un ingeniero quien, para realizar un proyecto determinado, se basa en los conocimientos científicos de su dominio y acepta someterse a un control de tipo científico. Sin embargo, al mismo tiempo, se encuentra obligado a trabajar con objetos mucho más complejos que los objetos depurados de la ciencia y, por lo tanto, tiene que abordar prácticamente, con todos los medios disponibles, problemas de los que la ciencia no quiere o no puede hacerse cargo (Artigue, 1989).

El objeto de la ingeniería didáctica fue pensado como el de las intervenciones didácticas en el dictado de clases, en forma de secuencias de lecciones; es decir, trata del diseño y evaluación de secuencias de enseñanza teóricamente fundamentadas y con la intención de generar la emergencia de determinados fenómenos didácticos, y elaborar recursos para la enseñanza científicamente experimentados. El término ingeniería didáctica se utiliza en ese sentido, con una doble función: como metodología de investigación y como producción concreta de situaciones de enseñanza y aprendizaje.

Douady (1996) plantea que:

“...el término ingeniería didáctica designa un conjunto de secuencias de clase concebidas, organizadas y articuladas en el tiempo de forma coherente por un profesor-ingeniero para efectuar un proyecto de aprendizaje de un contenido matemático dado para un grupo concreto de alumnos. A lo largo de los intercambios entre el profesor y los alumnos, el proyecto evoluciona bajo las reacciones de los alumnos en función de las decisiones y elecciones del profesor. Así, la ingeniería didáctica es, al mismo tiempo, un producto, resultante de un análisis a priori, y un proceso, resultante de una adaptación de la puesta en funcionamiento de un producto acorde con las condiciones dinámicas de una clase.”

Una característica de la metodología de la ingeniería didáctica, comparada con otros tipos de investigación basados en la experimentación en clase, que utilizan validación externa del tipo grupo experimental-grupo de control, es que ella es diferente: ubica la investigación en el

registro de estudios de caso y su validación es en esencia interna, basada en la confrontación entre un análisis a priori y un análisis a posteriori.

La ingeniería didáctica aborda fundamentalmente estudios de caso en los que se distinguen cuatro fases (Artigue, 1989): 1) análisis preliminares; 2) concepción y análisis a priori de situaciones didácticas; 3) experimentación; 4) análisis a posteriori y evaluación.

Análisis preliminares

Los análisis preliminares al diseño de un dispositivo de enseñanza contemplan, en primer nivel de elaboración, aspectos como: análisis epistemológico de los contenidos contemplados en la enseñanza; análisis de la enseñanza tradicional y sus efectos; análisis de las concepciones de los estudiantes, de las dificultades y obstáculos que determinan su avance; análisis del campo de restricciones donde se va a situar la realización didáctica efectiva.

Esos análisis preliminares dan sustento al diseño del dispositivo didáctico a implementar. En una investigación de ingeniería didáctica, la fase de concepción se basa no sólo en un cuadro teórico didáctico general y en los conocimientos didácticos previamente adquiridos en el campo de estudio, en el adecuado análisis preliminar, contemplando los aspectos antes mencionados (Artigue, 1995).

Si bien las exigencias de elaboración de un análisis preliminar no son las mismas para cualquier investigación, los análisis preliminares se mantienen, en general, en un primer nivel básico de elaboración, y luego se retoman y profundizan en el transcurso de las diferentes fases o etapas de la investigación, en función de las necesidades requeridas.

Concepción y análisis a priori

En esta segunda etapa, el denominado análisis a priori considera el dispositivo propuesto, elaborando hipótesis sobre su idoneidad para regular el comportamiento de los estudiantes orientado a la construcción de los conocimientos esperados.

El investigador toma la decisión de actuar sobre un determinado número de variables del sistema que no estén fijadas por las restricciones, denominadas variables de comando, que él percibe pertinentes con relación al problema de estudio. Estas variables de comando están clasificadas por Artigue del siguiente modo:

- Variables macrodidácticas o globales: concernientes a la organización global de la ingeniería.
- Variables microdidácticas o locales: concernientes a la organización local de la ingeniería, y que corresponden a la organización de la secuencia de enseñanza.

Lo dos tipos de variables no son independientes entre sí. Al ser la validación del proceso esencialmente interna, ya desde la fase de concepción se inicia el proceso de validación. Artigue considera en ese sentido al análisis a priori como un análisis de control de significado:

“Si la teoría constructivista sienta el principio de la participación del estudiante en la construcción de sus conocimientos a través de la interacción con un medio determinado, la teoría de las situaciones didácticas, que sirve de referencia a la metodología de la ingeniería didáctica, ha pretendido constituirse desde su origen en una teoría de control de las relaciones entre el significado y las situaciones.” (Artigue 1998, p. 44)

El objetivo del análisis a priori es determinar en qué medida las selecciones realizadas permitirán controlar los comportamientos de los estudiantes y la apropiación de significados. Este análisis se transforma, en ese sentido, en la explicitación de un conjunto de hipótesis sobre la utilidad del dispositivo diseñado para lograr los aprendizajes pretendidos. La validación de esas hipótesis está indirectamente en juego en la confrontación que se lleva a cabo posteriormente, entre el análisis a priori y el análisis a posteriori.

Artigue argumenta que tradicionalmente este análisis a priori comprende aspectos descriptivos y predictivos. Se requiere, fundamentalmente:

- Describir las selecciones del nivel local y las características de la situación didáctica que de ellas se desprenden.
- Analizar qué se pone en juego para un estudiante en la situación diseñada, en función de las posibilidades de acción, de selección, de decisión, de control y de validación que él dispone, una vez puesta en práctica en un funcionamiento casi aislado del profesor.
- Prever los campos de comportamientos posibles de los estudiantes en la situación didáctica o el dispositivo diseñado.

Experimentación

En la tercera etapa de la ingeniería didáctica se pone en juego el dispositivo didáctico y entran en contacto el investigador/profesor/observador con la población de los estudiantes objeto de la investigación. Constituye la etapa de experimentación, que supone:

- La explicitación de los objetivos y condiciones de realización de la investigación a los estudiantes que participarán de la experimentación;
- El establecimiento del contrato didáctico;
- La aplicación de los instrumentos de investigación;
- El registro de observaciones realizadas durante la experimentación.

Análisis a posteriori y validación

A la fase de experimentación sigue la de análisis a posteriori, que se basa en el conjunto de datos recogidos a lo largo de la experimentación, que incluyen las observaciones de las secuencias de enseñanza y las producciones de los estudiantes en clase o fuera de ella. Estos datos se completan con frecuencia con otros, obtenidos mediante cuestionarios, entrevistas individuales o en pequeños grupos, aplicadas en distintos momentos de la enseñanza o durante su transcurso.

Como ya se ha indicado, en la confrontación de los dos análisis, el a priori y a posteriori, se fundamenta la validación de las hipótesis formuladas en la investigación.

Una cuestión a tener en cuenta, si así lo requiere la puesta en práctica de la experimentación, es que las etapas mencionadas no son estrictamente rígidas. Hay, por ejemplo, casos en que se hace necesario realizar durante la propia etapa de experimentación un análisis a posteriori parcial, con el fin de hacer correcciones o adecuaciones sobre la marcha.

1.2 LA NOCIÓN DE IDONEIDAD DIDÁCTICA COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS

En la investigación centrada en el diseño de alternativas o dispositivos didácticos, la metodología propuesta por la ingeniería didáctica, que acabamos de describir, proporciona elementos para conducir tanto el proceso de diseño como la experimentación y evaluación de un dispositivo. Mientras que el análisis a priori constituye una base para fundamentar el diseño, el análisis a posteriori busca determinar la eficacia del dispositivo implementado para lograr los propósitos pretendidos, y establecer posibles mejoras o ajustes del mismo.

Pero la realización fundamentada de dichos análisis debe apoyarse en marcos teóricos e instrumentos y metodologías compatibles con ellos, que posibiliten una adecuada construcción de datos e interpretación de resultados. En ese sentido, consideramos que el denominado “enfoque ontosemiótico”, desarrollado en la Universidad de Granada, España, por Juan Godino y su equipo, y particularmente, dentro de ese marco teórico, la noción de idoneidad didáctica (Godino, 2011), pueden constituir una base importante, que puede ser utilizada tanto por profesores como por investigadores en didáctica de las ciencias.

Godino, Contreras y Font (2006) plantean que es importante indagar en qué medida una alternativa didáctica reúne ciertas características para ser considerada idónea para ciertos

propósitos educativos. Introducen, en ese sentido, la noción de idoneidad didáctica, como noción compleja y sistémica que incorpora diferentes criterios específicos, entendidos como idoneidades parciales, para la valoración de procesos de enseñanza/aprendizaje y de alternativas y dispositivos didácticos. Los criterios o idoneidades parciales que proponen los autores incluyen:

Idoneidad epistémica: se refiere al grado de representatividad de los significados institucionales implementados (o previstos), respecto de un significado de referencia.

Idoneidad cognitiva: expresa el grado en que los significados pretendidos/implementados estén en la zona de desarrollo potencial de los alumnos, así como la proximidad de los significados personales logrados por los estudiantes a los significados pretendidos/implementados.

Idoneidad interaccional: analiza en qué medida las configuraciones y trayectorias didácticas propuestas y/o implementadas permiten identificar potenciales conflictos semióticos (que se puedan detectar a priori), o resolver los conflictos que se producen durante el proceso de instrucción mediante la negociación de significados.

Idoneidad mediacional: considera el grado de disponibilidad y adecuación de los recursos materiales y temporales necesarios para el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Idoneidad emocional: se refiere al grado de implicación (interés, motivación) del alumnado en el proceso de estudio analizado. Se relaciona con varios factores, que dependen tanto del alumno y su historia escolar previa, como de la institución.

Idoneidad ecológica: grado de adaptación del proceso de estudio en un contexto particular en el que se implementa: el proyecto educativo de la institución, las directrices curriculares, las condiciones del entorno social, etc.

La figura 1.1 esquematiza la propuesta de los autores. Se representa mediante un hexágono regular la idoneidad correspondiente a un proceso de estudio pretendido o programado, donde a priori se supone un grado máximo para cada una de las idoneidades parciales. El hexágono irregular interno correspondería a las idoneidades efectivamente logradas en la realización de un proceso de estudio implementado

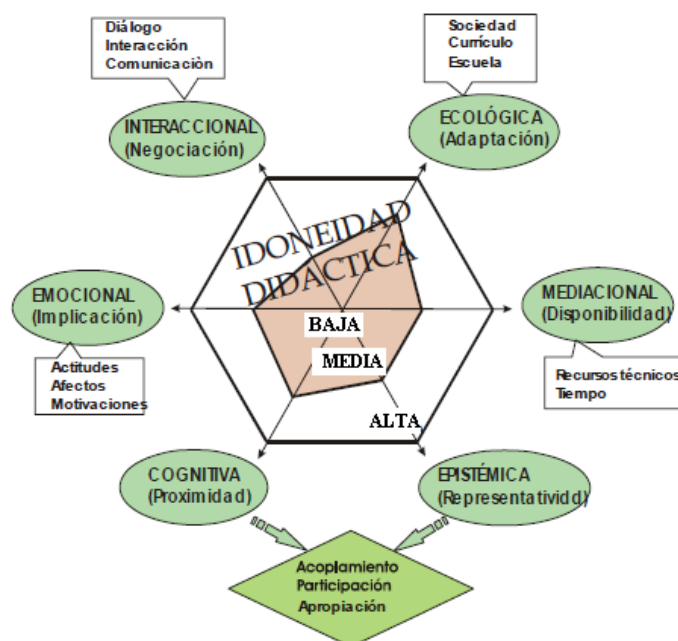


Figura 1.1: Componentes de la Idoneidad Didáctica Fuente: Godino, Batanero y Font (2007).

1.3 ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS. OBJETO Y SIGNIFICADO EN LA PERSPECTIVA ONTOSEMIÓTICA

En el Libro “Teoría de las Funciones Semióticas: Un Enfoque Ontológico-Semiótico de la Cognición e Instrucción Matemática”, presentado en el año 2003 para optar a la cátedra de Didáctica de la Matemática en la Universidad de Granada (España), Juan Godino sintetiza los aspectos relevantes del marco teórico que venía desarrollando desde hace años en el campo de la Didáctica de las Matemáticas. Desde entonces el enfoque ha sido ampliado y profundizado, y actualmente es una referencia para el desarrollo de numerosas investigaciones en didácticas específicas.

El autor propone un modelo teórico que procura articular las dimensiones semiótica, epistemológica, psicológica y sociocultural de la educación, aunque considera la semiótica como componente fundamental.

La perspectiva ontosemiótica toma como referencial el trabajo de Charles Sanders Peirce (1834-1914). Éste esgrime como uno de sus principios fundamentales que los elementos de la semiosis son necesariamente tres: signo, objeto e interpretante. El segundo elemento o relato de la semiosis (si tenemos en cuenta su "modo ser") es lo representado por el signo. A este elemento Peirce lo denomina "objeto". Es precisamente a partir de la caracterización del elemento objeto y sus componentes que Godino modeliza una perspectiva sistémica y compuesta como nueva alternativa en la investigación didáctica. En ese sentido, los constructos de “objeto” y “significado” constituyen la base de su modelo teórico.

1.3.1 La noción de Objeto

La noción de objeto adoptada por Godino (2003) se inspira en la Teoría desarrollada por Chevallard (1991). Chevallard llama praxema a los “objetos materiales ligados a las prácticas” y usa esa noción para definir el objeto como “emergente de un sistema de praxemas”. Concretamente, define el objeto como: “emergente de un sistema de prácticas donde son manipulados objetos que se desglosan en diferentes registros semióticos: registro de lo oral, palabras o expresiones pronunciadas; registro de lo gestual; dominio de la inscripción, lo que se escribe o dibuja (grafismos, formulismos, cálculos), es decir, registro de lo escrito” (pag.8).

Godino (2003) presenta el objeto como constructo central de su modelo y lo define como: “el emergente de un sistema de prácticas operativas y discursivas ante un cierto tipo de situaciones problema”, aclarando además que esta noción es sistémica y que el sistema de prácticas está asociado a un campo de problemas. Las prácticas operativas y discursivas sustituyen a los praxemas.

La perspectiva adoptada por Godino se aparta de los marcos teóricos más frecuentemente utilizados en el campo de la didáctica, en particular en lo que se refiere a la manera como se plantean las nociones de concepción y significado. Su visión se inscribe dentro de las corrientes de tipo pragmático, y, que ya mencionamos, está basado en el denominado enfoque antropológico elaborado en didáctica de las matemáticas por Chevallard. Podemos ver que la noción de praxeología de ese autor guarda similitud con el constructo “sistemas de prácticas institucionales ligadas a un campo de problemas”.

Plantea Chevallard:

“alrededor de un tipo de tareas , T , se encuentra así, en principio, una tripleta formada por una técnica (al menos), τ , por una tecnología de τ , θ , y por una teoría de θ , Θ . El total indicado por $[T / \tau / \theta / \Theta]$, constituye una praxeología puntual, donde este último calificativo significa que se trata de una praxeología relativa a un único tipo de tareas, T . Una tal praxeología – u organización praxeológica – está pues constituida por un bloque práctico-técnico, $[T / \tau]$, y por un bloque tecnológico-teórico $[\theta / \Theta]$. El bloque $[\theta / \Theta]$ se identifica habitualmente como un saber, mientras que el bloque $[T / \tau]$ constituye un

saber-hacer. Por metonimia se designa corrientemente como “saber” la praxeología [T / t / θ / Θ] completa o incluso cualquier parte de ella. Pero esta manera de hablar estimula una minoración del saber-hacer, sobre todo en la producción y difusión de las praxeologías” (Chevallard, 1999; p 224-229), citado por Godino y Batanero, 1994).

Además de la evidente influencia de la corriente antropológica, el autor reconoce otros aportes: las Teorías pragmáticas y realistas del significado (Ullmann, Kutchera), la Teoría de Campos conceptuales (Vergnaud), la Teoría de las situaciones didácticas (Brousseau) y el Interaccionismo Simbólico (Cob, Bauersfeld).

Si el objeto es considerado el emergente de un sistema de prácticas, la noción de práctica es fundamental, e involucra toda actuación o expresión (verbal, gráfica, etc.) que alguien realiza para resolver problemas, comunicar a otros la solución obtenida, validarla o generalizarla a otros contextos y problemas. Esta noción permite tener en cuenta el principio Piagetiano de la construcción del conocimiento a través de la acción.

En las disciplinas, más que una práctica particular en un problema concreto dado, interesan los tipos de prácticas, o los sistemas de prácticas prototípicas puestos de manifiesto por las personas en su actuación ante situaciones problemáticas.

La noción de situación problema es adoptada como primitiva, siendo caracterizada como cualquier tipo de circunstancia que precisa y pone en juego actividades disciplinares (en su caso particular, de matematización). Como ejemplo, podemos mencionar: construir o buscar posibles soluciones que no son accesibles inmediatamente; inventar una simbolización adecuada para representar situaciones y las soluciones encontradas o para comunicarlas, producir nuevas expresiones y enunciados significativos mediante manipulaciones simbólicas, justificar (validar, argumentar) soluciones, generalizarlas a otros contextos.

En las prácticas intervienen objetos materiales (símbolos, gráficos, etc.) y abstractos que son evocados y representados en forma textual, oral, gráfica o incluso gestual. Para cada tipo de problemas podemos asociar un sistema de prácticas prototípicas o características. Una práctica personal prototípica es significativa si esa práctica desempeña para el sujeto un papel relevante en la solución o validación y en la generalización a otros contextos y problemas.

Godino (2003) afirma que:

“una práctica personal prototípica es significativa (o tiene sentido) si, para la persona, esta práctica desempeña una función para la consecución del objetivo en los procesos de resolución de un problema, o bien para comunicar a otro la solución, validar la solución y generalizarla a otros contextos y problemas” (p.93).

Esto conduce a un modelo dinámico y constructivo del objeto y sugiere que, de un campo de problemas determinado, pueden emerger diversos objetos con sus respectivas relaciones. Las prácticas, los objetos que intervienen en ellas y los que emergen, están organizados en torno a la finalidad de adoptar decisiones, actuar y resolver situaciones problemáticas.

Para resolver o describir un problema se necesita del lenguaje, incluyendo elementos tales como términos, expresiones, notaciones, gráficos, etc. Además, para resolver los problemas se aplican acciones y/o técnicas, tales como algoritmos, cálculos, procedimientos y estrategias, que son específicos de cada tipo de problema. El sujeto evoca además conceptos (noción y definiciones que le sirven de apoyo) que involucran propiedades o atributos. Finalmente liga todas las acciones y objetos mediante argumentos o razonamientos, ya sea para comprobar las soluciones de los problemas, o explicar y justificar la solución (Godino y Recio 2001).

Debido a que las prácticas pueden variar en las distintas instituciones o personas, Godino concede al objeto una relatividad respecto a las mismas, y propone hacer referencia a objetos institucionales y personales. Define el objeto institucional como: “...el emergente de un sistema de prácticas sociales asociadas a un campo de problemas, donde esta emergencia es

progresiva en el tiempo, se le da un nombre y es reconocido por la institución, aunque después sufra transformaciones según el campo de problemas asociado". Por su parte, el objeto personal: "...es el emergente del sistema de prácticas personales significativas asociadas a un campo de problemas. Esta emergencia del objeto es progresiva a lo largo de la historia del sujeto, como consecuencia de la experiencia y el aprendizaje" (Godino y Batanero, 1994, p.335).

La génesis del conocimiento personal se produce como consecuencia de la interacción del sujeto con determinado tipo de problemas, mediatizada por los contextos institucionales en que tiene lugar dicha actividad. Es así que en la mente de los sujetos se construyen probablemente esquemas cognitivos responsables de que los sujetos sean capaces de reconocer las nuevas situaciones como pertenecientes a un cierto tipo y aplicarles los procedimientos pertinentes para resolverlas.

Es interesante destacar, en función de lo expresado, que la perspectiva pragmática adoptada no se interesa por definir ni caracterizar lo que sucede en la mente del sujeto (objetos mentales), sino que centra su atención en las prácticas concretas que el sujeto realiza (objetos personales).

En síntesis lo que este autor propone es que la noción de "objeto", es un constructo teórico de naturaleza pragmática que puede ser utilizado como herramienta del análisis didáctico. Del sistema de prácticas operativas y discursivas de una persona ante un tipo de situaciones problema se postula la emergencia de objetos personales e institucionales objetivados por un léxico común. Los objetos son considerados como símbolos de unidades culturales, emergentes de un sistema de usos ligados a las actividades de resolución de problemas que realizan ciertas personas y que van evolucionando con el tiempo. El hecho de que en el seno de ciertas instituciones se realicen determinados tipos de prácticas es lo que determina la emergencia progresiva de los objetos.

Godino distingue en los objetos una faceta ostensiva y una no ostensiva. Decir que un objeto tiene una faceta ostensiva, es considerar que el objeto es reconocido por una institución, lo que significa que se habla del mismo, se le nombra y se comunican sus características a otras personas, por medio de diferentes registros semióticos. Reconocer que un objeto tiene una faceta no ostensiva significa que un determinado sujeto es capaz de imaginar uno de estos objetos sin necesidad de expresarlo externamente.

1.3.2 La Concepción de significado

Desde el punto de vista de la didáctica, la noción de significado juega un rol importante en su relación con los objetos. Las ciencias preocupadas por la cognición humana como la psicología, la lingüística, la semiótica o la filosofía, contribuyen con sus aportes a la clarificación del mismo, pero hay que destacar que el abordaje del significado constituye de por sí una temática muy compleja.

Dos escuelas de pensamiento abordan el significado, desde la lingüística. Una tendencia analítica, también denominada referencial, realista o figurativa y una tendencia operacional, contextual o pragmática. La primera otorga a las expresiones lingüísticas solamente una función semántica, mientras que la segunda considera que la noción de significado en las expresiones lingüísticas depende del contexto en que son utilizadas (Godino y Font, 2007).

La concepción realista del significado es defendida por Ludwig Wittgenstein (1889-1951), que plantea que la formulación de una palabra se hace significativa porque desempeña una determinada función en un juego lingüístico y cobra significado al ser usada en ese juego de una manera determinada y para un fin concreto. No es necesario que haya algo que sea el significado mental de esa palabra para que la misma resulte significativa. Peirce es también un referente fundamental de la teoría pragmática operacional del significado y lo define en términos contextuales, destacando particularmente la importancia de los signos.

El sistema de nociones desarrollado por el equipo de Godino (Godino y Batanero, 1994), intenta construir una alternativa particular respecto a la cuestión del significado de los conceptos. Proponen la idea de situación problema como primitiva y otorgan al objeto un rol central, entendiéndolo como emergente del sistema de prácticas operativas y discursivas que se realizan para dar cuenta de las situaciones problema.

El significado de un objeto resulta ser, en este marco, una entidad compuesta que incluye el conjunto de prácticas significativas relacionadas con un cierto campo o tipo de problemas. Su noción de práctica significativa está asociada a la idea de praxis en el sentido de Morin (1977) y toma la noción de esquema utilizada por Vergnaud (1990): “organización invariante de la conducta para una misma clase de situaciones dadas”. Considerar al significado de un objeto como entidad compuesta implica reconocer que en el mismo confluyen diferentes elementos, que dan cuenta del carácter sistémico del objeto

1.3.3 Elementos del Significado

El enfoque ontosemiótico (Godino y Recio, 1998; Godino y Batanero, 1998; Godino, 2002) caracteriza el significado como entidad compuesta integrada básicamente por una praxis, un logos y un lenguaje. Las situaciones problema, y las acciones y técnicas asociadas, conforman el componente práctico o praxis. A su vez, los conceptos-definiciones; proposiciones y argumentaciones o validaciones constituyen el componente teórico o discursivo, es decir, el logos. Los sistemas de prácticas amalgamados de esta manera constituyen sistemas discursivos y operativos, que se articulan a través del lenguaje, sea este formal o coloquial, oral o escrito.

El triplete constituido por praxis, logos y lenguaje es desagregado en la propuesta de Godino y su equipo, en seis elementos básicos que integran el significado: Situaciones-problema/Tareas; Lenguaje; Acciones/Técnicas; Conceptos; Propiedades y Argumentos (figura 1.2).

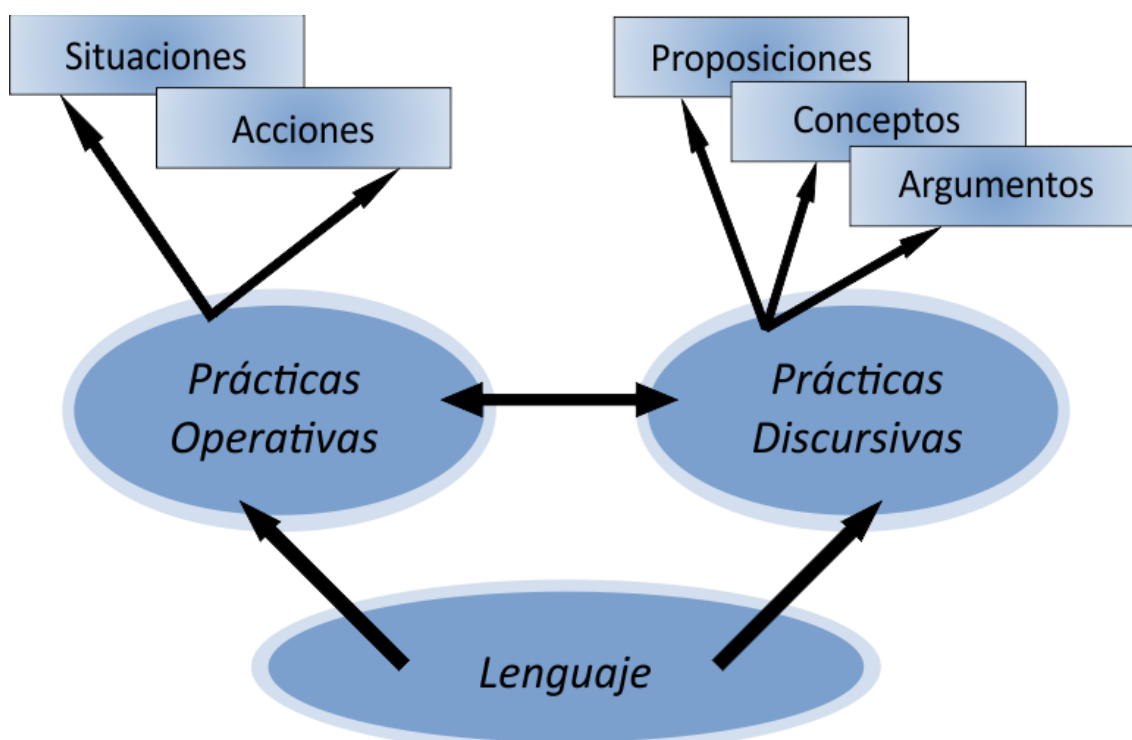


Figura 1.2 Elementos del significado. Entidades primarias

Las situaciones problema contextualizan la actividad en sí, y se pueden agrupar en diferentes grados de complejidad. Pasar de una situación problema a otra indica un avance del conocimiento ya sea a nivel institucional como personal. Las acciones y las técnicas tienen que ver con los algoritmos, las operaciones y las estrategias que se ponen en juego en la resolución de los problemas.

Los conceptos, reglas y definiciones, son considerados, tomando como base las ideas de Wittgenstein y Vergnaud, como los invariantes operatorios que determinan la emergencia del objeto, sea en la faceta institucional o en la personal.

Los argumentos son ideas o principios que orientan el razonamiento que nos lleva de las cuestiones o problemas, las observaciones y los experimentos a los enunciados, teorías o modelos que construimos para resolverlos o explicarlos. Las argumentaciones pueden ser de diferente tipo incluyendo generalizaciones, utilización de contraejemplos o demostraciones.

1.3.4 La Relatividad de los significados: Institucionales y personales

La noción sistémica y pragmática del significado otorga al significado de los objetos dos dimensiones: Personal e Institucional. Debido a que el significado de los objetos disciplinares está referido a la acción (interiorizada o no) que realiza un sujeto en relación a los objetos, lo esencial para Godino es que en las instituciones no son las propiedades o atributos o definiciones lo más importante, sino que además lo es su uso como herramienta de análisis y toma de decisiones en cierto tipo de situaciones problemáticas. Entonces, un mismo término puede ser usado para referirse a unidades culturales o institucionales diferentes.

El significado institucional de un objeto, es “...*el sistema de prácticas institucionales asociadas al campo de problemas de las que emerge el objeto en un momento dado. Se trata de un constructo relativo a la institución y dependiente estocásticamente del tiempo*”(Godino y Batanero, 1994). La institución puede ser un referencial científico o un referencial local. Siendo la noción de significado un conjunto de prácticas prototípicas, es dable entonces pensar que en el objeto institucional emergente de esas prácticas, estén incorporadas todas las prácticas y situaciones problemas que correspondieren, la génesis del objeto y el cambio de significado a través del tiempo atravesado por la historia del objeto mismo.

El significado personal de un objeto es “...*el sistema de prácticas personales de una persona para resolver el campo de problemas del que emerge el objeto en un momento dado*”. Con esta definición, el objeto depende del sujeto y del tiempo; se desarrolla progresivamente a medida que el sujeto se enfrenta a tipos de problemas cada vez más generales.

Godino y Font (2007) proponen una clasificación de significados personales e institucionales distinguiendo unos de otros por la tipificación que se indica en la figura 1.3.

Según los autores, los significados institucionales se diferencian en tipos, tales como:

- Implementado: en un proceso de estudio específico es el sistema de prácticas efectivamente implementadas por el docente.
- Evaluado: el subsistema de prácticas que utiliza el docente para evaluar los aprendizajes.
- Pretendido: sistema de prácticas incluidas en la planificación del proceso de estudio.
- Referencial: sistema de prácticas que se usa como referencia para elaborar el significado pretendido. En una institución de enseñanza concreta, este significado de referencia será una parte del significado holístico del objeto. La determinación de dicho significado global requiere realizar un estudio histórico – epistemológico sobre el origen y evolución del objeto en cuestión, así como tener en cuenta la diversidad de contextos de uso donde se pone en juego dicho objeto.

Los significados personales, también están clasificados en diferentes tipos:

- Global: corresponde a la totalidad del sistema de prácticas personales que es capaz de manifestar el sujeto relativas a un objeto.
- Declarado: da cuenta de las prácticas efectivamente expresadas a propósito de las pruebas de evaluación propuestas, incluyendo tanto las correctas como las incorrectas desde el punto de vista institucional.
- Logrado: corresponde a las prácticas manifestadas que son conformes con la pauta institucional establecida. En el análisis del cambio de los significados personales que tiene lugar en un proceso de estudio interesará tener en cuenta los significados iniciales o previos de los estudiantes y los que finalmente alcancen.

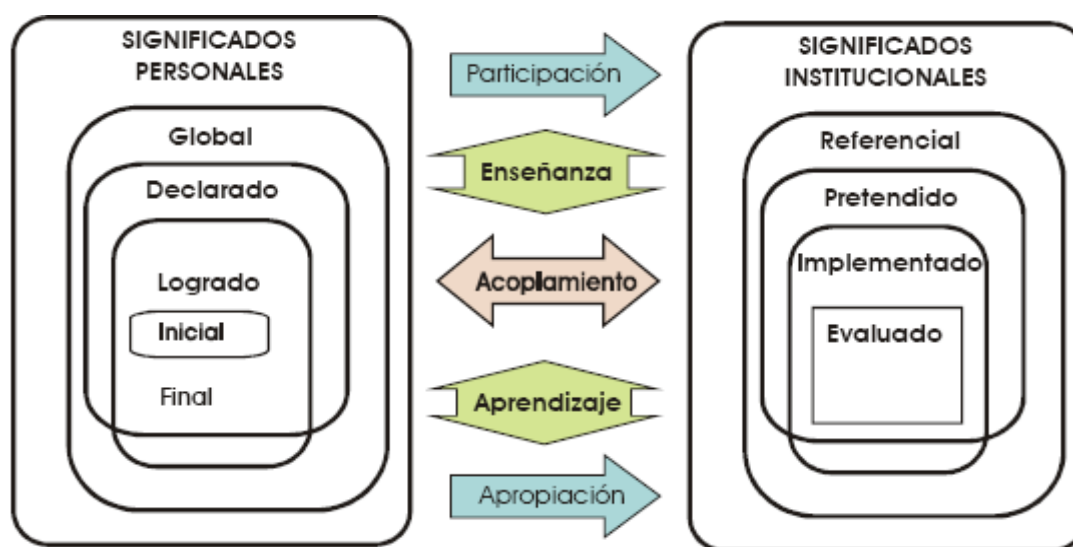


Figura 1.3: Tipos de significados institucionales y personales. Fuente: Godino et al 2006.

El significado institucional local presenta facetas que se apoyan en el sistema de prácticas que se proyecta para un proceso de estudio particular. El significado institucional de referencia es un sistema de prácticas más amplio, de donde se selecciona el significado pretendido y el implementado, es decir el sistema de prácticas que efectivamente se implementa durante la realización de la instrucción proyectada. La última faceta es el significado evaluado, asociado al sistema de prácticas seleccionadas para evaluar los aprendizajes.

Las facetas del significado personal involucran un significado global atento a la totalidad del sistema de prácticas personales que es capaz de manifestar potencialmente un alumno; las prácticas efectivamente expresadas a propósito de las pruebas de evaluación propuestas, incluyendo tanto las correctas como las incorrectas desde el punto de vista institucional y el significado logrado por las prácticas conforme a las pautas institucionales establecidas.

Para los investigadores, una persona comprende el significado de un objeto institucional o se apropia del significado de un concepto cuando reconoce los diferentes elementos componentes del mismo y es capaz de relacionarlos con los objetos emergentes de distintas situaciones problema. Un objeto institucional que está ligado a un campo de problemas donde se pone en juego una articulación entre prácticas institucionales y personales, genera en el sujeto significados personales, que se evidencian en las distintas tareas que realiza.

1.4 EL MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO ADOPTADO Y SUS APORTES PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS.

La noción de idoneidad didáctica, y la descomposición de dicha noción propuesta por Godino y

sus colaboradores dentro del enfoque ontosemiótico, constituyen una herramienta interesante para el análisis didáctico, que puede ser utilizada tanto por los profesores como por los investigadores en didáctica de las ciencias.

Desde la perspectiva del profesor, posibilita una mirada distinta de atención en las articulaciones entre los significados personales e institucionales que ayuda a mejorar su práctica docente de manera sistémica, contemplando todos los aspectos relevantes de una intervención didáctica. Desde la perspectiva de investigación, proporciona elementos concretos para llevar adelante un análisis exhaustivo de una experiencia didáctica, como la que hemos realizado y describimos en este trabajo.

Como herramienta metodológica brinda oportunidades para mejorar las prácticas docentes y tomar decisiones pedagógicas adecuadas, permitiendo la descripción de los procesos de enseñanza aprendizaje en el marco del enfoque ontosemiótico, y el análisis del grado en que un determinado proceso alcanza los fines pretendidos.

Para la investigación que emprendimos, donde, como ya explicitamos, nos interesamos en la implementación de un dispositivo didáctico basado en simulaciones para la enseñanza de un concepto complejo, el enfoque ontosemiótico y particularmente la noción de idoneidad didáctica nos proporcionaron los constructos teóricos básicos en términos de los cuales hemos podido describir y analizar la experiencia. Pero a su vez, la perspectiva de la ingeniería didáctica, con sus análisis a priori y a posteriori, definió los aspectos a contemplar para la evaluación de la experiencia realizada.

El modelo teórico abordado permitió refinar las preguntas iniciales, que fueron entonces reformuladas del siguiente modo:

- 1 ¿Qué grado de idoneidad epistémica puede atribuirse a la experiencia, es decir, qué grado de representatividad poseen los significados implementados respecto del significado epistémico de referencia local y general?
- 2 ¿En qué medida los significados puestos en juego en la experiencia, resultan significativos para los estudiantes y contribuyen a incorporar los significados de referencia?
- 3 ¿Cuál es el grado de implicación de los estudiantes durante el proceso de estudio?
- 4 ¿En qué medida los modos de interacción docente-discente permiten identificar y resolver conflictos de significado, favorecen la autonomía en el aprendizaje y el desarrollo de competencias comunicativas?
- 5 ¿En qué medida los recursos materiales, las condiciones de aula y el tiempo empleado son adecuados para el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje pretendido?
- 6 ¿En qué medida la acción definida resultó adecuada para una mejor comprensión del concepto de entropía en el contexto en que fue implementada?

En lo que se refiere a la implementación de la experiencia, adoptamos además como perspectiva metodológica, la propuesta de la ingeniería didáctica, respetando sus etapas según hemos descripto anteriormente.

En la etapa preliminar, investigamos el significado que la comunidad científica atribuye al concepto de Entropía (significado de referencia), considerando tres enfoques diferenciados: el tradicional, el axiomático y el microscópico. Analizamos también el significado de entropía tal como es abordado en el contexto donde se desarrolló la experiencia (significado local) y el significado que le atribuyen los estudiantes tomando como referencia trabajos de diferentes autores (significados personales). Por otro lado analizamos diversos artículos que tratan sobre el uso de simulaciones en la enseñanza y realizamos una búsqueda intensiva de simulaciones sobre entropía en la web a fin de seleccionar aquellas que utilizaríamos en la experiencia.

Teniendo en cuenta dichos análisis preliminares, establecimos los propósitos de enseñanza de

la experiencia (significados pretendidos) y diseñamos un dispositivo didáctico a implementar. El mismo fue organizado como un Trabajo Práctico en el cual los estudiantes debían realizar un conjunto de actividades tomando como base cuatro simulaciones (applets).

Considerando el dispositivo didáctico propuesto, el análisis a priori consistió en elaborar hipótesis sobre su idoneidad, que serían luego contrastadas con los resultados de la implementación del dispositivo. Se buscó identificar cuáles eran los elementos del significado puestos en juego a través de las actividades propuestas (situaciones-problema; lenguaje; técnicas; conceptos/propiedades; argumentos) y analizar en qué medida ellos guardan correspondencia con los significados institucionales pretendidos (idoneidad epistémica) y son accesibles y alcanzables por los estudiantes (idoneidad cognitiva).

Para organizar el análisis a priori se elaboró un cuestionario que se aplicó al recurso diseñado. Dicho cuestionario es una adaptación del aplicado por Godino, Wilhelmi y Bencomo (2005) en una experiencia de estudio sobre la idoneidad didáctica de una secuencia de enseñanza en matemática. Las preguntas del cuestionario son las siguientes:

- ¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso?
- ¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse el recurso?
- ¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas?
- ¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)?
- ¿Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades/acciones/técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad?
- ¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta?
- ¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet?
- ¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos, ¿tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable?
- ¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen?
- ¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

Luego de la puesta en marcha e implementación del dispositivo didáctico, realizamos un análisis a posteriori, tomando como base la información recogida durante el proceso. Dicho análisis fue organizado también en base a un cuestionario, con las siguientes preguntas de referencia:

- ¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?
- ¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en el applet?
- ¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?
- ¿Lograron los alumnos la apropiación de los conocimientos pretendidos?

En la confrontación de los análisis a priori y a posteriori, se fundamentó en esencia la valoración sobre la idoneidad del dispositivo didáctico. Tanto en uno como en el otro, nos hemos centrado en los significados. Los resultados del análisis realizado sobre la idoneidad didáctica del dispositivo se presentan en el capítulo 5.

Índice

2.1 Significado Institucional. Análisis histórico

- 2.1.1 De Carnot a Clausius. La perspectiva clásica**
- 2.1.2. Maxwell, Boltzmann. La perspectiva microscópica**
- 2.1.3 Controversias entre energetismo y atomismo**
- 2.1.4 Planck y Gibbs. La profundización de los paradigmas**
- 2.1.5 Carátheodory. La perspectiva axiomática**
- 2.1.6 Otras perspectivas**

2.2 Significado Institucional. Análisis de textos

- 2.2.1 Enfoque clásico**
- 2.2.2 Enfoque microscópico**
- 2.2.3 Enfoque axiomático**
- 2.2.4 Comparación de las presentaciones**

2.3 Significado institucional local. Análisis del contexto

- 2.3.1 Análisis del libro de texto**
- 2.3.2 Análisis de las clases**
- 2.3.3 Entropía en el contexto local**

2.4 Significados Personales. Concepciones de los estudiantes

- 2.4.1 Investigaciones sobre los significados personales**
 - 2.4.2 Síntesis de las concepciones y potenciales dificultades en el contexto local**
-

En este capítulo analizamos el significado de la Entropía. Siguiendo los lineamientos del enfoque ontosemiótico, nos referimos al significado considerando tres aspectos: institucional, local y personal

El significado institucional, en la perspectiva de Godino, se refiere a aquél aceptado y compartido por la comunidad científica, y que sería, por lo tanto, el presentado normalmente en textos de nivel universitario. Pero debemos tener en cuenta que, en el caso particular de la entropía, este significado no es único, sino que depende del enfoque con que se plantea la termodinámica. Como iremos mostrando a través del análisis histórico y la revisión de algunos textos significativos, podemos distinguir tres enfoques diferentes y, consecuentemente, tres modos distintos de atribuir significado a la entropía: el fenomenológico o clásico; el axiomático y el microscópico o corpuscular.

El significado local se refiere a aquél atribuido en el contexto específico que estamos considerando. Es decir, el significado de la entropía que es enseñado en la institución en la que

realizamos la experiencia. Hemos caracterizado dicho significado a partir del libro de texto utilizado por los docentes y los registros disponibles de las observaciones de clases.

Con los significados personales nos referimos a aquéllos que le atribuyen los estudiantes. Nos interesan particularmente los significados espontáneos vinculados a nociones relacionadas como la de irreversibilidad y equilibrio, así como también las dificultades en la comprensión conceptual de entropía. Realizamos un análisis a partir del relevamiento efectuado de artículos de investigación que tratan específicamente estas cuestiones.

2.1. SIGNIFICADO INSTITUCIONAL. Análisis histórico

Para caracterizar el significado institucional de la entropía hemos realizado un análisis sobre cómo se fue construyendo la noción de entropía desde el siglo XIX hasta nuestros días. Rescatamos en ese marco algunos hitos históricos que han sido relevantes en la construcción del concepto, considerando particularmente los aportes de Carnot, Kelvin, Clausius, Boltzmann, Planck, Gibbs y Caratheodory.

2.1.1. De Carnot a Clausius. La perspectiva clásica

Durante parte del siglo XVII y en el transcurso del siglo XVIII, la idea de obtener efectos mecánicos en forma eficiente a partir del fuego, fue creciendo dentro de un contexto que alimentaba las posibilidades de obtener mejoras sustanciales en el aprovechamiento del uso del vapor de agua.

Las máquinas térmicas se desarrollaron tecnológicamente desde su forma más incipiente, en el siglo XVIII, hasta prácticamente la forma en que los conocemos actualmente, hacia mediados del siglo XIX, sin que hubiese existido una adecuada explicación científica de su funcionamiento.

En 1824 Nicolás Leonard Sadi Carnot (1796-1831), publica en Francia una memoria titulada *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*¹. Dicho trabajo, centrado en el interés por mejorar la eficacia y la versatilidad de las máquinas de vapor, abre el camino para sentar las bases de lo que serían las leyes fundamentales que gobiernan los procesos que involucran transformaciones de calor en trabajo.

Carnot estaba interesado en aumentar y mejorar el rendimiento de las máquinas térmicas. Su propósito era dar a conocer las posibilidades que brindan las máquinas de vapor y brindar un informe detallado de su importancia.

Su trabajo se sustentaba en la hipótesis de la existencia del calórico, que en ese momento era admitida por todos. Consideraba que la potencia motriz de una máquina térmica se produce cuando el calórico pasa desde un cuerpo caliente (caldera) hasta otro frío (condensador) y pensaba el funcionamiento de un motor térmico (máquina de fuego) como análogo al de una máquina hidráulica. Su analogía era la siguiente:

Así como el trabajo realizado por la rueda hidráulica se debía al paso del agua a través de una diferencia de potencial gravitatorio, el trabajo de la máquina térmica se producía por el paso de calórico a través de una diferencia de temperaturas. En la rueda hidráulica, la potencia motriz depende de la cantidad de agua y de la altura desde la que cae, mientras que en la máquina térmica la potencia motriz depende de la cantidad de calórico y la magnitud de la diferencia de temperaturas entre las cuales se mueve el calórico.

¹ La obra de Carnot fue publicada por Bachelier, el principal editor de trabajos científicos de Francia. Las *Réflexions* se tradujeron al inglés recién en 1890.

Cantidad de agua	→	Cantidad de calor
Nivel superior	→	Temperatura más alta
Nivel inferior	→	Temperatura más baja

Una representación artística tomada del libro “La entropía desvelada” de Ben Naim (2011), es una excelente visión de la analogía entre la caída de agua y caída de calórico.

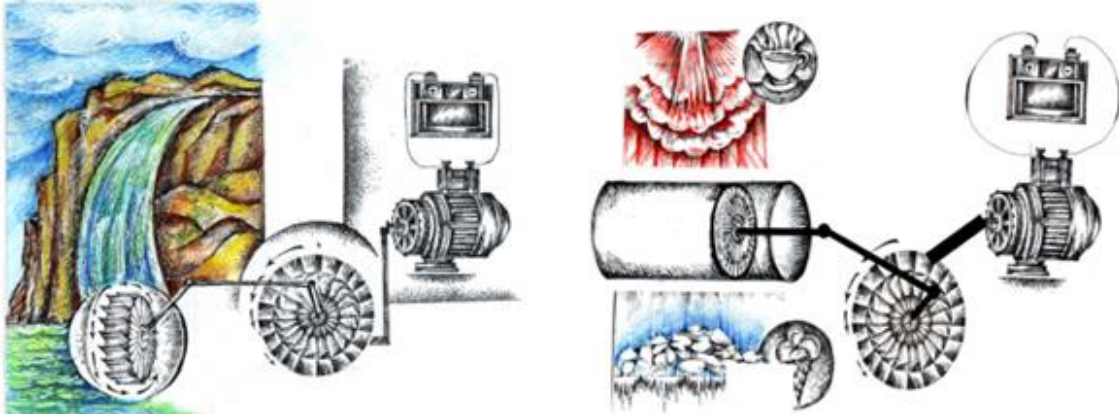


Figura 2.1: Representación artística: caída de agua y caída de calórico. Fuente: Ben-Naim (2011)

Wilson (1981) destaca que Carnot no definió el rendimiento de la máquina tal cual lo conocemos hoy en día, sino que solo definió el máximo servicio de una máquina: su efecto útil (cuánta agua es elevada multiplicada por la altura) para una cantidad de carbón dada. En consonancia con la teoría del calórico, el calor era un fluido imponderable y sin masa, que se conserva siempre; por lo tanto no podía suponer que el calor podía convertirse en trabajo y el trabajo mecánico en calor, como tampoco podía definir el rendimiento de una máquina.

Carnot buscaba resolver si existía algún límite para convertir calor en trabajo o sería posible un movimiento continuo. Describió una serie de operaciones para un gas (aire) encerrado en un cilindro que opera en un sentido y en un orden inverso, provisto de un diafragma (émbolo). El cilindro operaba entre dos cuerpos que se mantenían a temperatura constante, siendo una de las temperaturas más elevada que la otra. Diseñó así el ciclo energético de una máquina ideal, cuyo rendimiento depende únicamente de la temperatura inicial y final del fluido que impulsa la máquina, con independencia de la naturaleza de la misma. Dejó clara la imposibilidad de movimiento perpetuo, poniendo límites a la eficiencia de cualquier máquina que se construyera.

Cárdenas Ramírez (1992) subraya que Carnot demostró que solamente una fracción del calor cedido a una máquina térmica es convertida en trabajo; que el rendimiento depende de la diferencia de temperaturas entre las fuentes de calor y que el mayor rendimiento posible lo presentan las máquinas reversibles.

Pérez Cruz (2007) resalta el carácter genérico del método de Carnot, cuyos resultados son aplicables a cualquier dispositivo independientemente de la forma en que está diseñado y de los materiales con que está construido.

Esencialmente, Carnot tenía un problema técnico que le llamaba la atención. Las máquinas de la época consumían mucho combustible (carbón) a cambio de obtener un trabajo muy limitado. A pesar de tomar todas las precauciones técnicas a su alcance de ajustar lo mejor posible las válvulas de la máquina, cambiar de fluido, evitar al máximo las pérdidas por las paredes, etc., pensó que había otro factor que influía en la eficiencia de las mismas.

Observó el funcionamiento de la máquina de vapor: en la caldera el combustible se consume para hervir y vaporizar el agua; el vapor sufre la expansión y el condensador convierte el vapor en agua líquida con lo que “se restablece el equilibrio del calórico”. El flujo de calor en la máquina transcurre retornando el sistema a un estado de equilibrio, cuando el fluido alcanza la temperatura del condensador. Detectó que el calor fluye desde el vaporizador hacia el condensador (en una sola dirección), por lo que el calor va desde la zona de alta temperatura a la de baja temperatura y, al pasar por el cilindro, genera trabajo. De las observaciones hechas, concluyó que el calórico no se pierde, pero la sola producción de calórico no es suficiente para generar fuerza motriz y es necesario que haya algo frío simultáneamente para obtener trabajo. No se puede condensar el vapor si solo hay cuerpos calientes.

Observó que un cuerpo al calentarse o enfriarse cambia de volumen debido a un cambio en la temperatura, que ejerce una fuerza y con ello realizar trabajo. Afirma: “todas las sustancias son capaces de vencer, en su cambio de volumen, cierta resistencia y, de este modo, desarrollar trabajo”. Entendía el trabajo como el efecto de la presencia de una fuerza impulsora actuando contra una resistencia. Sabía que en un sistema hidráulico se puede obtener trabajo del fluido agua, si se le opone una rueda de paletas. Al oponer una resistencia al sistema que evoluciona, se obtenía trabajo; en la máquina térmica esa oposición sería la expansión del vapor.

Seguidamente su interés estuvo fijado en averiguar si la potencia motriz del calor era una cantidad invariable o si variaba con el fluido utilizado para desarrollar trabajo. Definió los límites de temperatura en que opera la máquina y demostró que para un cambio de temperatura dado no importa el tipo de fluido.

La idea latente de si todo el calor se puede convertir en trabajo fue un punto crucial en su estudio y propuso un sistema formado por dos cuerpos A y B; el primero a una temperatura 100 y al segundo a 0. Supuso que entre estas dos temperaturas fijas fluye una cantidad definida de calórico y escribió: “tanto calórico como el necesario para fundir 1 kg de hielo”².

Afirma: siempre que exista una diferencia de temperatura es posible obtener trabajo. Supone que recíprocamente, siempre que consumimos esa misma cantidad de trabajo podemos obtener una diferencia de temperatura; es decir producir una pérdida de equilibrio en el calórico. Aquí es donde aparece la noción de ciclo, donde los cambios de temperatura son idénticos en valor absoluto. La máquina ideal es el modelo capaz de operar entre dos temperaturas fijas, distintas entre ellas. El calor fluye de la temperatura más alta a la más baja. El flujo de calor lo recibe el agua. El agua se vaporiza, pasa como vapor a un cilindro provisto de un émbolo, sin fricción y sin peso y se expande lentamente, haciendo una cantidad de trabajo. Piensa que cuanto más lenta se haga la expansión mayor será el trabajo obtenido de ella. El artificio para obtener el “máximo trabajo” fue hacer lenta la expansión.

Conclusión: Para lograr un trabajo de un sistema que evoluciona espontáneamente hacia el equilibrio es necesario oponerle una resistencia. La expansión del fluido debe ser lenta, pero para que esto ocurra, la fuerza que se debe oponer a la fuerza impulsora debe ser grande, casi igual a la fuerza impulsora y que el trabajo será máximo cuando la fuerza de resistencia sea apenas infinitesimalmente menor que la fuerza impulsora. Esta es la definición de reversibilidad termodinámica actual.

- 1) Si una fuente de calor de tamaño muy grande (infinito) provee una cantidad de calor definida, la fuente no cambiará su temperatura por la entrega de calor.
- 2) Si un fluido recibe calor sin pérdidas, lo emplea para vaporizarse.

² Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego. Sadi Carnot. Alianza Editorial, 1987.

- 3) El vapor entra en un cilindro provisto de un pistón sin fricción ni peso y sufre una expansión haciendo el máximo trabajo. Al expandirse disminuye la temperatura del fluido.
- 4) En el condensador, el fluido se condensa a líquido e intercambia calor con agua corriente, devolviendo al émbolo a su posición inicial de admisión de calor.

Demuestra conceptualmente que no es posible el movimiento perpetuo y escribió:

“Si fuera posible por cualquier otro método, hacer que el calórico produjera una potencia motriz (trabajo) mayor que la obtenida en nuestra primera serie de operaciones, bastaría tomar una parte de esa potencia para hacer volver, por el método que hemos indicado, el calórico del cuerpo B al cuerpo A, del refrigerador al fogón para restablecer las cosas en su estado primitivo y situarse en condiciones de volver a empezar de nuevo una operación completamente análoga a la primera y así sucesivamente: esto sería no solo el movimiento perpetuo, sino una creación indefinida de fuerza motriz sin consumo de calórico, ni de cualquier otro agente”.

No pudo hacer una formulación precisa del rendimiento porque no conocía la manera de conversión de calor en trabajo y se requería de la noción de temperatura absoluta. Dedujo la eficiencia de una máquina para un ciclo de temperaturas entre 78,71° y 77,7° para vapor de agua y para vapores de alcohol y encontró prácticamente las mismas eficiencias. Demostró también que la eficiencia de su ciclo es mayor cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas: cuanta más alta la temperatura del foco caliente mayor será el trabajo o la energía. Este descubrimiento no fue una formulación de la Segunda Ley pero sembró la semilla inicial para ello (Ben Naim, 2007).

En 1834, Émile Clapeyron (1799-1864) publicó una obra titulada “Memoria sobre la potencia motriz del calor”. En esta obra, hizo una revisión crítica del trabajo de Carnot. Tradujo el ciclo de operaciones de la máquina de fuego ideal a través de un dibujo explicativo donde trazó dos curvas adiabáticas y dos curvas isotérmicas en un diagrama presión versus volúmenes específicos y explicó el procedimiento que utilizó Carnot para llegar a obtener el rendimiento máximo. En síntesis, Clapeyron pone en forma matemática y gráfica las reflexiones de Carnot. Utilizó la noción del calórico como si fuese una propiedad que se conserva en el ciclo.

Entre 1842 y 1847, cuatro científicos dispersos por toda Europa, Julius von Mayer (1814-1878), James Prescott Joule (1818-1889), Ludwig August Colding (1815-1888) y Hermann Helmholtz (1821-1894), y salvo este último, ignorando cada uno de ellos el trabajo de los demás, hicieron pública la hipótesis de conservación de la energía. La equivalencia entre el calor y trabajo no es otra cosa que un caso especial de conservación de la energía. Según Kuhn (1996), la historia de la ciencia no ofrece otro caso más sorprendente de descubrimiento simultáneo.

Entre 1850 y 1870, con los aportes fundamentales de Joule, así como los de William Thomson (1824-1907, conocido también como Lord Kelvin) y los de Rudolf Gottlieb (1822-1888, conocido como Clausius) se construyó la teoría que sustentaría y argumentaría la evolución de la tecnología de las máquinas térmicas, llegando a formular el Segundo Principio de la Termodinámica y a discutir y desmenuzar los conceptos de calor y energía. La teoría del calórico fue dejándose paulatinamente de lado, aunque el interrogante sobre qué cantidad de calor cedida a una máquina térmica es aprovechable, continuó en el foco de atención. La búsqueda de respuesta a ese interrogante fue precisamente lo que condujo a la enunciación de la Segunda Ley de la Termodinámica y al concepto de Entropía.

En 1843, Joule, publicó un trabajo titulado “Acerca de los efectos caloríficos de la magneto electricidad y acerca del valor mecánico del calor”. Postuló que el trabajo mecánico se convierte en calor y proporcionó un valor del equivalente mecánico del calor. Como no estaba satisfecho con los resultados obtenidos, abordó una serie de trabajos haciendo sucesivas mediciones a fin de lograr una medida del equivalente mecánico del calor. Publicó algunos

trabajos más sobre el tema al cual estaba firmemente abocado, pero la publicación efectiva del trabajo de paletas con la cifra actualmente conocida data de 1850.

En 1847 realizó una presentación de sus trabajos en la que estuvo presente Lord Kelvin, quien observó que la exposición de Joule entraba en contradicción con la teoría del calórico (que presupone que el calor se conserva). Los trabajos de Joule implicaban que calor y efecto mecánico (trabajo) eran intercambiables, lo cual era incompatible con la vieja idea de Carnot.

En esta efervescencia de ideas, Kelvin continuó trabajando en el tema e hizo dos aportes fundamentales a la teoría de la termodinámica. Uno fue la creación de la escala de temperaturas absolutas. El otro aporte fue desmenuzar los planteos de Carnot, planteando los calores transferidos como función de las temperaturas de las fuentes y expresando una medida del rendimiento de un motor en función de las temperaturas absolutas.

La creación de la escala se materializó durante 1848. En esa época las mediciones de temperatura se realizaban con diferentes escalas, lo cual dificultaba su medida. Rondaba en Kelvin la idea de determinar una escala que permitiera la comparación de medidas realizadas con diferentes instrumentos y en diferentes lugares del mundo, independientemente de la sustancia termométrica utilizada. En el afán de superar los inconvenientes desde el punto de vista conceptual que generaba esta situación, propuso la escala de temperatura absoluta a partir de una interpretación del principio de Carnot. A tal fin estableció:

“Una propiedad característica de la escala que propongo es que todos los grados tengan el mismo valor; o sea, una unidad de calor que cede un cuerpo A a la temperatura T° de esta escala, a un cuerpo B a una temperatura $(T-1)^{\circ}$ producirá el mismo efecto mecánico cualquiera que sea el número T. Esto se llama escala absoluta, ya que es independiente de las propiedades físicas de cualquier sustancia específica”.

Durante 1849, Kelvin publicó “Una descripción de la Teoría de Carnot y de la potencia motriz del fuego”, trabajo en el que expresó el rendimiento térmico del ciclo hipotético de Carnot en términos de las temperaturas absolutas. En 1851 publicó una memoria donde reconcilia el trabajo de Carnot con el de Benjamín Thompson (1753-1814) (conde de Rumford) y los trabajos de Humphry Davy (1778-1829) y Julius von Mayer. En esa memoria enuncia la primera ley de la termodinámica y relacionó el aporte de Carnot con la segunda ley. Es aquí donde propone un enunciado de la segunda ley:

“Es imposible construir una máquina que trabaje en un ciclo completo y no produzca otro efecto distinto de elevar un peso y enfriar un depósito de calor”

Por esa época también Clausius venía trabajando en estas cuestiones. Tanto él como Kelvin aceptaban la idea establecida por Carnot de que hay conversión de calor en trabajo siempre que el calor fluya de la fuente caliente a la fuente fría, pero rechazaron la hipótesis de que el calórico se conserva en el ciclo de Carnot. En la década de 1850, Clausius publicó tres artículos muy importantes:

- Sobre la fuerza motriz del calor y las leyes que de ella pueden ser derivadas para la teoría del calor (1850).
- Sobre una forma modificada del segundo principio de la teoría mecánica del calor (1854).
- Sobre el tipo de movimiento que llamamos calor (1857).

Los dos primeros artículos son considerados como la primera exposición de la termodinámica fenomenológica y no hay en ellos ninguna evidencia sobre la constitución microscópica de la materia. En el último artículo, sin embargo, sienta las bases para la teoría cinética de los gases que más adelante se incorporará en la mecánica estadística.

El artículo de 1850, está dividido en dos partes tituladas: “Consecuencias del principio de equivalencia de calor y trabajo” y “Consecuencias del principio de Carnot en conexión con el anterior”. En este trabajo aparecen los conceptos de calor y trabajo como funciones

diferenciales y una función U , sin aclarar de qué se trata. Plantea la existencia de una relación entre el calor consumido y el trabajo realizado. Coincidimos con Moulines (2011) en destacar que un elemento crucial en su pensamiento fue pensar que no todo el calor pasa de la caldera al condensador sino que una parte del mismo aparece en la forma de efecto mecánico; de esta manera compatibiliza los razonamientos de Carnot y Joule y enuncia claramente el principio de equivalencia entre calor y trabajo:

“En todos los casos en los que trabajo es producido por calor, se invierte una cantidad de calor proporcional al trabajo realizado, y recíprocamente, a través del consumo de una cantidad similar de trabajo, puede generarse la misma cantidad de calor”.

En la construcción de su teoría se limita a considerar los gases ideales y los vapores al máximo de su densidad. Basa sus argumentaciones en un análisis teórico-empírico de los ciclos de Carnot-Clapeyron. Admite que Q y W son funciones diferenciales, reformula la relación y presupone que ambas magnitudes dependen de otras fundamentales P , V , t . Plantea que un cuerpo puede hallarse en un mismo estado al principio y al final de un proceso determinado (un ciclo) y no obstante, el valor de Q y W para ese estado puede ser diferente al inicio y al final del proceso. En su análisis del calor suministrado a un cuerpo, considera que una parte se invierte en superar la presión exterior y otra parte es invertida en superar la atracción mutua de las partículas. A la primera la denomina trabajo exterior y la segunda es un trabajo interno para la que introduce una función arbitraria, a la cual no da ningún nombre y que simboliza con U . El hecho de trabajar con transformaciones cerradas le brinda la ventaja de hacer cero el trabajo interno y por lo tanto hacer referencia sólo al trabajo externo. Para un ciclo no cerrado, expresa el calor suministrado al cuerpo de la siguiente manera:

$$\delta Q = dU + A \frac{a+t}{v} dv$$

El primer término corresponde al trabajo interno y el segundo al externo. Vemos que la expresión es bastante similar a la presentación actual del Primer Principio de la Termodinámica.

Clausius destaca que la idea de Carnot de que el calor pasa íntegramente del cuerpo caliente al frío es errónea. A su vez, destaca que la operación en sentido contrario requiere de la utilización de un trabajo externo que lo posibilite.

“No es posible sin gasto de fuerza de ningún tipo pasar calor de un cuerpo frío a un cuerpo caliente”

En el artículo de 1854 continúa tratando de asentar la nueva termodinámica fenomenológica despegada del calórico. Trata exclusivamente los ciclos y define ciclo como proceso de transformación, a través del cual el cuerpo vuelve al estado inicial. Aborda los dos principios de la termodinámica en forma independiente presentando el artículo dividido en dos partes: “Principio de la equivalencia calor y trabajo” y “Principio de la equivalencia de las transformaciones”.

Considera un ciclo de carácter general, no necesariamente reversible. Piensa que la transformación de calor en trabajo y la transformación de calor en alta temperatura a calor a baja temperatura pueden ser equivalentes. De acuerdo a eso, el flujo de calor de un cuerpo caliente a un cuerpo frío (con la consecuente transformación de calor en trabajo) debería ser compensado por la conservación de trabajo en calor, de modo que el calor debería fluir del cuerpo frío al cuerpo caliente. Introduce el concepto de valor de equivalencia de una transformación térmica como una medida de la relación entre cantidad de calor (Q) y la temperatura (T) a la cual sucede la transformación. Llamó equivalentes a ambas transformaciones porque se podían sustituir una por otra en el mismo ciclo. Suponiendo que se ha dado una transferencia de calor entonces, suponiendo el ciclo actuando en sentido inverso, el calor podría devolverle su temperatura original y se produciría una conversión de

trabajo en calor. Clausius asignó valores positivos de transformación a esos procesos y negativos a sus opuestos y estableció que los valores de transformación podrían ser funciones universales de calor y temperatura.

Un fragmento textual de dicho trabajo es ilustrativo del pensamiento de Clausius:

“He retrasado hasta el presente la publicación del resto de mi teorema, porque conduce a una consecuencia que es considerablemente diferente de las ideas mantenidas generalmente sobre el calor contenido en los cuerpos, y consideré recomendable estudiarla con más profundidad. Pero como me he vuelto más y más convencido en el curso de los años que no debemos asignar demasiado peso a dichas ideas, las cuales en parte están fundadas más en la costumbre que sobre bases científicas, siento que no debo dudar más, sino someter a la comunidad científica el teorema de la equivalencia de las transformaciones en su forma completa, con los principios que se deducen del mismo. Me aventuro a esperar que la importancia que dichos principios, suponiendo que sean ciertos, poseen en conexión con la teoría del calor, será suficiente para justificar su publicación en la presente forma hipotética. Cuando un cuerpo experimenta un proceso circular o cíclico, puede realizar una cierta cantidad de trabajo externo en cuyo caso una cierta cantidad de calor debe ser gastada simultáneamente. Recíprocamente, puede recibir trabajo externo y ganar una cierta cantidad de calor. Esto puede ser expresado diciendo -Calor puede ser transformado en trabajo o trabajo en calor a través de un proceso cíclico-. Puede haber otro efecto de un proceso cíclico: el calor puede ser transferido de un cuerpo a otro, a través del cuerpo que está sufriendo la modificación absorbiendo calor de un cuerpo y cediéndoselo de nuevo a otro. En este caso los cuerpos entre los cuales tiene lugar la transferencia de calor han de ser considerados simplemente como almacenes de calor, de los cuales no nos concierne conocer otra cosa que las temperaturas. Si las temperaturas de ambos cuerpos son diferentes, el calor pasa, o bien de un cuerpo caliente a un cuerpo frío o bien de un cuerpo frío a un cuerpo caliente, según la dirección en que tenga lugar la transferencia de calor. Tal paso de calor puede también ser denominado, con propósito de uniformidad, como una transformación, en tanto y en cuanto puede decirse que calor a una temperatura es transformado a calor a otra temperatura. Los dos tipos de transformaciones que hemos mencionado son relacionadas de tal manera que una presupone la otra, y que ellas pueden sustituirse mutuamente entre sí. Si llamamos transformaciones que puedan sustituirse entre sí equivalentes, y buscamos las expresiones matemáticas que determinan la magnitud de las transformaciones de manera que transformaciones equivalentes tengan igual magnitud, llegamos a la siguiente expresión: Si la cantidad de calor Q a la temperatura t es producida a partir de trabajo el valor equivalente de esta transformación es Q/T

Si la cantidad de calor Q pasa de un cuerpo cuya temperatura es t_1 a otro cuya temperatura es t_2 el valor equivalente de esta transformación es:

$$Q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

donde T es una función de la temperatura que es independiente del tipo de proceso a través del cual es efectuada la transformación, y T_1 y T_2 denotan los valores de esta función que corresponden a las temperaturas t_1 y t_2 : He mostrado por otras consideraciones que con toda probabilidad T no es otra cosa que la temperatura absoluta. Estas dos expresiones nos permiten reconocer el sentido positivo o negativo de las transformaciones. En la primera, Q es tomada como positiva cuando trabajo es transformado en calor, y como negativa cuando calor se transforma en trabajo. En la segunda Q puede ser tomado siempre como positivo, ya que los sentidos opuestos de la transformación son indicados por la posibilidad de que la diferencia

$$\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

sea bien negativa o positiva. Puede verse pues que el paso de calor de una temperatura más alta a una temperatura más baja ha de ser visto como una transformación positiva, y el paso de una temperatura más baja a una más alta como una transformación negativa. Si representamos las transformaciones que tienen lugar en un proceso cíclico por esas expresiones, la relación existente entre ellas puede ser establecida de una forma simple y definitiva. Si el proceso cíclico es reversible, las transformaciones que tienen lugar deben ser en parte positivas y parte negativas, y los valores equivalentes de las transformaciones positivas deben ser conjuntamente iguales a aquellos de las negativas, de manera que la suma algebraica de los valores equivalentes es igual a cero. Si el proceso cíclico es no reversible, los valores equivalentes de las transformaciones positivas y negativas no son necesariamente iguales, pero pueden sólo diferir de forma que predominen las transformaciones positivas. La proposición relativa a los valores equivalentes de las transformaciones puede según esto ser establecida de la siguiente forma:

La suma algebraica de todas las transformaciones que ocurren en un proceso cíclico puede sólo ser positiva, o como caso extremo nula.

La expresión matemática para esta proposición es como sigue: sea dQ un elemento del calor dado por el cuerpo a cualquier almacén de calor durante sus modificaciones (siendo identificado como negativo el calor que puede ser absorbido), y T la temperatura absoluta del cuerpo al momento de suministrar este calor entonces la ecuación debe verificarse

$$\int \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

para todo proceso cíclico reversible, y la relación

$$\int \frac{\delta Q}{T} \geq 0$$

debe verificarse para cualquier proceso cíclico, en cualquier forma posible que éste sea”.

En 1865 publica un trabajo titulado: *Sobre las diferentes formas de las ecuaciones fundamentales de la teoría mecánica del calor*. En este trabajo cambia el criterio del signo relativo al calor en la suma de las transformaciones y escribe:

$$\int \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

y la variable introducida en 1854 pasa, de llamarse valor de equivalencia, a llamarse Entropía:

$$S - S_0 = \int \frac{\delta Q}{T}$$

2.1.2. Maxwell y Boltzmann. La perspectiva microscópica

La termodinámica basada en Carnot, Kelvin, Joule y Clausius a que hemos hecho referencia hasta ahora, no hacía alusión alguna a hipótesis sobre la estructura de la materia.

Sin embargo, venían desarrollándose hipótesis corpusculares y los intentos de abordar el estudio cuantitativo de las leyes macroscópicas empleando modelos mecánicos basados en la existencia de partículas se remontaban a Robert Boyle (1627- 1691), quien durante 1660 en el estudio de los Gases ideales, trataba la elasticidad del aire desde la visión corpuscular. Daniel Bernoulli (1700-1782) utilizó el mismo recurso en su obra *Hydrodynamica*, en la que trata las propiedades y movimiento del aire mediante el modelo corpuscular. También John Herapath (1790-1869) identificaba, en sus Anales de Filosofía, el calor con movimiento interno.

Cabe destacar que el propio Clausius realizó también aportes relevantes que contribuyeron a instalar el paradigma cinético molecular en la segunda mitad del siglo XIX. En 1857, publicó un artículo en el que presentaba un modelo dinámico, suponiendo que todas las moléculas tienen energía proporcional a la temperatura y dando de ese modo el puntapié inicial para la equipartición de la energía que se desarrollaría más tarde. Durante 1858, en otro trabajo importante, redescubre el concepto de camino libre medio, que había sido definido por John James Waterston (1811-1883), como concepto fundamental de la teoría cinética.

En 1860, James Clerk Maxwell (1831-1879) publica una obra fundamental en este proceso, que versa sobre la teoría cinética de los gases. En ella demuestra que la distribución de velocidades entre las moléculas de un gas sigue la misma ley de los errores que había sido deducida por Karl Friedrich Gauss (1777-1855) en 1795. El objetivo básico de la teoría cinética de los gases fue explicar el comportamiento termodinámico de un gas a partir de las partículas que lo componen. Maxwell analizó el equilibrio térmico e investigó la distribución de probabilidad de los distintos estados microscópicos compatibles con dicho estado de equilibrio. Fue el primero en probar que para conocer las propiedades de los gases no es necesario conocer la velocidad y posición de cada una de las moléculas que pueden considerarse sus componentes, sino que basta saber el número medio de moléculas que tienen una posición y una velocidad.

En 1866 Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906) publica un artículo titulado: “Sobre el significado mecánico del segundo principio de la teoría del calor”, donde aborda el problema del equilibrio térmico para el caso de un gas, estudiado por Maxwell, de un modo diferente. En ese trabajo aparece una primera forma de la Entropía en términos mecánicos y la temperatura absoluta en función de la energía cinética de las moléculas (Ordoñez Rodríguez, 1986).

Posteriormente, durante 1868 publicó otro artículo sobre teoría cinética, generalizando la distribución de velocidades de Maxwell, para un gas bajo la acción de un campo externo. Adoptó la hipótesis ergódica, destacando que para lograr las condiciones de equilibrio era necesario estipular los valores que podían tomar las magnitudes de las moléculas que componían el sistema y adoptando como hipótesis que las coordenadas y las velocidades de las moléculas podían tomar, a medida que transcurre el tiempo, todos los valores posibles que fuesen compatibles con la energía total del gas.

En 1871 Maxwell publica un libro sobre la “Teoría del calor”. A pesar de haberse ya desarrollado la teoría cinética en cierta medida, es en esa publicación donde por primera vez aparece la entropía como una probabilidad (García Colin, 2006), considerando que la Segunda Ley tenía un alto contenido probabilístico y que no se podía demostrar sólo a partir de las leyes de la mecánica. Odón Ordoñez (2007) destaca que en el artículo que publicó Boltzmann en 1872 titulado “Estudios posteriores sobre el equilibrio térmico de un gas formado por moléculas”, puso de manifiesto por primera vez el incremento, de entropía en los procesos irreversibles y demostró que la ley de distribución de velocidades de Maxwell determina el estado de equilibrio de un gas: *“Sea cual sea el estado inicial que tenga un gas, debe siempre aproximarse en el límite a la distribución encontrada por Maxwell”*. En este artículo plantea el tratamiento de la energía como una variable discreta, dejando en claro la preferencia por procedimientos atomísticos.

Lo relevante del trabajo de Boltzmann reside en pensar la termodinámica de manera mecanicista estableciendo un vínculo entre Entropía y su estado de probabilidad. El núcleo importante para lograrlo lo establece a través de una función de distribución que determina la densidad de partículas que hay en un dado rango de energías. Debido a los choques entre partículas se produce un intercambio de energía entre ellas modificándose la función de distribución por lo que, para obtener una ecuación diferencial que tenga en cuenta las interacciones, supuso que las colisiones eran totalmente azarosas y que el gas estaba suficientemente diluido. Obtuvo una ecuación en función de la velocidad como variable

destacada donde la densidad resulta determinada por el tipo de interacciones entre las partículas. Logró la solución de equilibrio de la ecuación introduciendo la distribución de velocidades de Maxwell Boltzmann y, a los efectos de demostrar la tendencia al equilibrio, introdujo una función H que corresponde a una medida intuitiva de cómo se distribuyen las velocidades, pudiendo mostrarse que $dH/dt < 0$ y que vale cero sólo en el equilibrio.

Un gran sector de la comunidad científica del momento puso en tela de juicio la consistencia de la teoría de Boltzmann, con fuertes críticas a la descripción atomista-mecanicista de los fenómenos térmicos. Algunos científicos exponían sus objeciones desde el pensamiento filosófico, mientras que otros se centraban en los aspectos técnicos. Entre las objeciones de tipo técnico fueron relevantes las que se referían no tanto al aspecto matemático de la deducción presentada en el artículo de 1872, sino a las consecuencias que suponía tratar la irreversibilidad por procedimientos mecánicos de tipo probabilístico. Una de las críticas de tipo técnico provino de Joan Joseph Loschmidt (1821-1895), denominada Objeción de Reversibilidad, criticando el hecho de que el análisis mecánico del Segundo Principio no podía dar cuenta de la irreversibilidad. El *teorema H* de Boltzmann establecía que si inicialmente un gas tuviese una distribución de velocidades fuera del equilibrio debería evolucionar monótonamente hacia él, y una vez logrado, debería permanecer allí. Sin embargo las leyes de la mecánica, que presuponen la reversibilidad de los fenómenos mecánicos, eran aparentemente incompatibles con el teorema H .

A pesar de las críticas, Boltzmann insistía constantemente con el carácter estadístico de la Segunda Ley e incluso Maxwell, diez años antes se había manifestado a favor de la certeza estadística del Segundo Principio de la Termodinámica. La respuesta de Boltzmann a Loschmidt argumentaba que el núcleo de la Segunda Ley estaba en que se trataba de una expresión directa de las leyes de la probabilidad; que la entropía de un estado es una medida de su probabilidad y que la entropía aumenta debido a que los sistemas evolucionan de los estados menos probables a los estados más probables.

En dicha respuesta realizó una nueva presentación del Segundo Principio dejando de lado el planteamiento cinético clásico. Los razonamientos de Boltzmann en ese trabajo se basan en la manera de distribuir la energía total del gas. Cuenta directamente el número de maneras distintas en que puede realizarse una distribución, utilizando un procedimiento totalmente combinatorio. Razonó que para lograr el equilibrio del sistema debía conseguir a través de las diferentes maneras una distribución que sucediera de un modo preferente conseguida a través del máximo número de caminos posibles.

García Colin (1981) destaca que Boltzmann hizo notar que para abordar un problema de esa índole, o sea, examinar la mecánica de un sistema macroscópico como lo es un mol de gas a temperatura ambiente, necesariamente hay que recurrir a la estadística matemática y referirse a los atributos macroscópicos medibles en el laboratorio como valores promedio de ciertas cantidades que reflejan un efecto colectivo de la población del sistema y no de valores individuales. Para ello examina un conjunto de partículas y su acomodación en celdas, de modo que en cada una haya para cada instante de tiempo muchas moléculas, no tantas como N y bastante más que una o dos. Imagina una visión instantánea del sistema en la que el número de ocupación de cada celda está presente habiendo por ejemplo n_1 partículas en la celda 1; n_2 partículas en la celda 2 y así sucesivamente de modo que:

$$n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots = N, \text{ y al ser la energía constante}$$

$$n_1 \epsilon_1 + n_2 \epsilon_2 + \dots + n_i \epsilon_i + \dots = E$$

Surge que hay muchas maneras de acomodar a las moléculas en las celdas. Ese número determina lo que se llama complexión del sistema. Como hay un sinnúmero de formas de elegir a los números de ocupación consistente con las dos ecuaciones establecidas hay otro tanto número de complexiones. Designa con Ω el número de complexiones o microestados

denominada probabilidad termodinámica, estableciendo el macroestado como la suma de todos los posibles microestados o las posibles complexiones. Al ser ese macroestado la suma de todas las posibles complexiones o microestados definidos por los números de ocupación, solo podrá depender de E, N y V, es decir $\Omega = \Omega(E, N, V)$. A medida que transcurre el tiempo el movimiento incesante de las partículas hace que las n_i varíen en cada instante de tiempo y por lo tanto Ω cambia con el tiempo.

Boltzmann interpretó el resultado obtenido por Clausius para la entropía, en el sentido de que en un sistema aislado ($E=\text{cte}$; $V=\text{cte}$; $N=\text{cte}$) en equilibrio, la entropía adquiere un valor máximo. En el modelo planteado por Boltzmann, a pesar de que la distribución de moléculas en las celdas cambia con el tiempo, razonó que debía existir una distribución que tenga una abrumadora frecuencia de aparición mayor que cualquier otra concebible. Esa distribución, que se puede obtener matemáticamente, es la distribución de Maxwell-Boltzmann y que debido a ese hecho hay una relación funcional entre S y $\Omega_{\text{máx}}$ de modo que $S = f(\Omega_{\text{máx}})$.

El número de caminos posibles lo expresó entonces como:

$$\Omega = \frac{n!}{(w_0)! (w_1)! (w_2)! \dots \dots \dots (w_p)!} \text{ complexiones distintas}$$

El número Ω es el que adopta Boltzmann como una medida de la probabilidad del estado representado por un cierto conjunto de números naturales $w_0, w_1, \dots, w_p$ donde cada w_k representa el número de moléculas con la correspondiente energía k.

La distribución de equilibrio según el postulado de Boltzmann es el máximo valor de Ω . Calcula el máximo del $\ln \Omega$ utilizando la aproximación de Stirling al tratarse de grandes valores de n y w_k ; pero al pasar al límite $\epsilon \longrightarrow 0$, es decir, al recuperar el continuo clásico para la energía de las moléculas obtuvo dos resultados importantes: Dedujo la distribución de Maxwell para la energía cinética de las moléculas y justificó que el valor de $\ln \Omega$, para esa distribución de equilibrio coincidía con la entropía termodinámica del gas.

Extendió la identificación entre Entropía y $\ln \Omega$, a situaciones de no equilibrio y asoció una entropía a cualquier estado del gas, fuese de equilibrio o no. Lo anterior conjuntamente con el teorema H le permitió deducir que la entropía del gas crecía con el tiempo hasta un valor máximo: el correspondiente al equilibrio. Su memoria de 1877 finaliza sugiriendo una generalización a sólidos y líquidos, dejando establecido que la evolución de un sistema aislado siempre conduce hacia estados más probables, hasta alcanzar el de máxima probabilidad (máxima entropía) que es la característica básica del estado de equilibrio. Esta es la interpretación probabilística de Boltzmann del Segundo principio.

Tiempo después que Boltzmann justificara la teoría con el objetivo de superar la objeción de reversibilidad de tipo probabilístico, Ernst Zermelo (1881-1953) interpela a Boltzmann con otra objeción, la denominada Objeción de Recurrencia. La misma se basaba en el teorema de recurrencia formulado por Henri Poincaré (1854-1912), que afirmaba que si un sistema comenzaba en un estado arbitrario cualquiera, debía evolucionar de modo de regresar a estados cercanos al estado inicial y lo haría un sinnúmero de veces. Para Zermelo, el teorema de recurrencia de Poincaré mostraba que aún cuando el teorema H establece que un sistema se aproxima monotónicamente al equilibrio, el mismo debería volver un sinnúmero de veces a su estado inicial arbitrario.

Debido a las críticas recibidas contra la teoría cinética y también a los importantes análisis críticos por parte de Maxwell; tanto éste como Boltzmann y otros científicos realizaron formulaciones probabilísticas de la teoría. Maxwell analizó hasta dónde la irreversibilidad que marca la Segunda Ley era inviolable e inventó el demonio de Maxwell, mientras que Boltzmann, en su trabajo de 1877, completó el análisis de su teoría considerando el punto de

vista estadístico, y presentando de forma clara y desarrollada la justificación probabilística del segundo principio.

2.1.3. Controversias entre energetismo y atomismo

La propuesta de Boltzmann y las objeciones filosóficas y técnicas realizadas a sus trabajos generaron en las últimas décadas del siglo XIX profundas controversias, que desembocaron en la rivalidad entre dos corrientes de pensamiento: Energetismo y Atomismo. Figuras importantes de la talla de Wilhelm Ostwald (1853-1932) y científicos positivistas como Ernst Mach (1838-1916), Pierre Duhem (1861-1916) y Henri Poincaré (1854-1912), entre otros, se oponían a lo que ellos llamaban la reducción que Boltzmann hacía de las leyes de la termodinámica, a leyes estadísticas, enfrentándose en duros cuestionamientos filosóficos y epistemológicos.

La idea que manifestaban estos científicos trataban de sustentarla admitiendo que la hipótesis atómica no era más que un modo de “salvar los fenómenos”. El energetismo podía sostener una exposición, un escrito matemático elegante, y por supuesto todo lo que se refería a la termodinámica: las relaciones de calor y trabajo, cualquiera que sea la fuente originaria de ese trabajo; los cambios de estado; la mecánica química; pero era insuficiente para hacer comprender los fenómenos físicos, como los fenómenos de orden cinético y los fenómenos electromagnéticos cuya importancia relativa iba en aumento, por esos años.

Ostwald consideraba que lo único que aparecía en las ecuaciones de la termodinámica era energía en sus distintas manifestaciones, sin referencia alguna a los constituyentes de la materia. De allí que átomos, iones o moléculas debían ser tomados como ficciones matemáticas para poder explicar las operaciones de la energía. Mach se refería a la hipótesis atómica como a un ente metafísico, desde el punto de vista físico por no tener una base empírica. En su obra: “La mecánica en su desarrollo histórico-crítico”³, afirmaba que:

“Si por ejemplo, se explican los fenómenos químicos, eléctricos, ópticos por medio de átomos, la concepción auxiliar de los átomos no se ha ajustado al principio de continuidad, sino que ha sido más bien inventada propiamente para este fin. Los átomos no se perciben en ninguna parte; son conceptos mentales como todas las sustancias. Si, a veces, se adscriben a los átomos propiedades ajenas a todas las observaciones hechas hasta el momento. Aunque sea cierto que los átomos sirven para reproducir una serie de hechos, los científicos que han tomado en serio las reglas de filosofar de Newton solo aceptarán estas teorías como accesorios provisionales, hasta hallar un sustituto en forma de una concepción más natural.”

Según Ordoñez Rodríguez (1986), la concepción que Mach tenía de la teoría era de una traducción de la experiencia y para él era fundamental la cuestión de la pureza del conocimiento científico. Boltzmann, en cambio, entendía la teoría como una invención, como una imagen de la realidad que se construye con toda la ayuda necesaria para que contribuya a mejorar la potencia inventiva del científico. No admitía que las ecuaciones diferenciales dieran razón directamente de la experiencia, ya que las hipótesis tienen una función heurística, no importa que los átomos no puedan observarse en lo inmediato.

En resumen, la escuela energetista, tenía como cometido desarrollar una ciencia, la energética, por lo que rechazaba el uso de modelos mecánicos en física y también el modelo atómico-molecular de la materia, pero en cambio aceptaba la energía y la conservación de la misma como realidades últimas y no como conocimiento hipotético.

Entre los defensores del energetismo predominaron los químicos frente a los físicos, mientras que los que usualmente mantenían una posición sobre el atomismo, la mayoría de los

³ 1883. Octava edición de 1921, p.466.

científicos eran físicos, marcando esto diferencias en las maneras en como los químicos y físicos observan la naturaleza y la naturaleza de la ciencia. Ambas líneas de pensamiento marcan también diferentes formas de pensar la termodinámica y como caso especial pensar y medir la entropía. Los energetistas tenían un punto de vista asociado con el fin de la visión mecanicista de la naturaleza, mientras que Boltzmann consideraba las teorías científicas como imágenes conceptuales o representaciones del mundo, más que una descripción directa basada en hipótesis realistas.

Moreno González (2006) destaca que la controversia entre energetismo y atomismo hizo que los modelos atomistas de Maxwell y Boltzmann contribuyeran a los inicios de la mecánica de los cuantos, mientras que las propuestas energetistas contribuyeron al desarrollo de la termodinámica de los procesos irreversibles.

2.1.4. Planck y Gibbs. La profundización de los paradigmas.

Como mencionamos anteriormente, no pocas controversias se suscitaron en torno a la termodinámica. Los paradigmas imperantes entre la segunda mitad del siglo XIX y la primera década del siglo XX entraron en interacción. En este escenario cabe destacar el importante rol desempeñado por Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), quién, por un lado realizó una sólida fundamentación de la perspectiva clásica (dentro de la visión propia del energetismo) y por otro lado, a partir de sus investigaciones sobre la radiación del cuerpo negro sentó las bases de la cuantización de la energía, echando mano a las hipótesis atomísticas de Boltzmann.

En 1878 eligió la termodinámica como tema de investigación. En 1879 defiende su tesis de doctorado sobre la segunda ley de la termodinámica y el concepto de Entropía. Sus investigaciones iniciales, a partir de su tesis de doctorado, estuvieron centradas en extender el rango de aplicación de la termodinámica, de sistemas caracterizados por magnitudes macroscópicas, como volumen, presión o temperatura, a sistemas que implicasen por ejemplo procesos electroquímicos, reacciones químicas o transiciones de fase. A partir de 1894 sus investigaciones se centraron en relacionar la irreversibilidad manifestada por el segundo principio de la termodinámica (crecimiento de la entropía) con otras leyes (todas invariantes bajo inversión temporal), principalmente sobre electrodinámica y mecánica de modelos continuos. La interpretación estadística de Boltzmann no contaba entre sus planes; buscaba leyes que se verificasen siempre, leyes absolutas y no probabilísticas. Planck rechazaba de hecho no solo la interpretación probabilística del segundo principio establecida por Boltzmann, sino toda relación estadística que podía derivarse de éste para tratar de justificar las leyes de la física.

Antes de 1900 Planck se interesó profundamente en los trabajos de Clausius y apoyado en la hipótesis del enunciado de Clausius, que “el calor no puede pasar espontáneamente de un cuerpo más frío a otro más caliente”, le agrega una explicación aclaratoria, porque según sus palabras no sólo intenta expresar que el calor no pasa directamente de un cuerpo más frío a otro más caliente, sino también que es imposible transmitir calor, por medio alguno, de un cuerpo más frío a otro más caliente, sin que ocurra en la naturaleza algún cambio que sirva como compensación (Martínez, 2012). En su empeño por aclarar ese punto todo lo posible expresó: *“El proceso de conducción del calor no puede ser invertido completamente en forma alguna”* A un proceso que no puede ser invertido completamente lo llamó proceso natural. Es lo que actualmente se denomina irreversible. Planck se preguntaba cómo varía la entropía con el tiempo a medida que el sistema evolucionaba aislado térmica y mecánicamente en el entorno. En su tesis doctoral escribe la expresión para la entropía $S' - S \geq 0$. Es decir, ésta aumenta o permanece constante en el tiempo. El hecho experimental conocido como enunciado de Kelvin-Planck fue:

“No es posible ninguna transformación termodinámica cuyo único resultado sea la absorción de calor de un solo foco y la producción de una cantidad equivalente de trabajo”.

Este enunciado cuyo origen es puramente experimental, rechaza todas las tentativas realizadas para crear el motor perpetuo que convertiría cíclicamente y a expensas de una sola fuente, calor en trabajo.

Desde aproximadamente 1895 realizó varios trabajos sobre el análisis de diferentes problemas asociados con el comportamiento de la radiación del cuerpo negro. En un trabajo de 1899 deduce una relación sobre la energía media de un resonador que le permitió calcular la frecuencia de un resonador hasta que en 1900 obtiene la expresión para la distribución espectral. Adopta procedimientos estadísticos por lo que estos resultados se vuelcan luego a la mecánica cuántica y esencialmente no era otro que el método probabilístico de Boltzmann que previamente había rechazado incluyendo la utilización de los elementos discretos de energía. Fue precisamente Planck quien escribe la expresión de Boltzmann para la Entropía como $S = k \ln \Omega$ (Sánchez Ron, 1995).

Otro investigador relevante que no puede dejar de mencionarse es Josiah Willard Gibbs (1839-1903) quien, a partir de 1873, comienza a publicar trabajos bajo la perspectiva de la termodinámica clásica. Son significativos, en ese sentido sus aportes a la teoría del equilibrio de sistemas heterogéneos y reactantes en cuanto a las aplicaciones fisicoquímicas y publica en 1875 *“Sobre el equilibrio de sustancias heterogéneas”* e introduce los potenciales termodinámicos energéticos. Los entrópicos habían sido introducidos por Massieu en 1869.

Introduce el método geométrico, que confiere a la termodinámica una dimensión mucho más amplia que la hasta entonces admitida, permitiendo abordar de una forma unificada y general problemas como el equilibrio de fases, el equilibrio químico y, en definitiva, todos los problemas de la físico-química relacionados con el equilibrio macroscópico de un sistema. Introdujo términos en el lenguaje como función de estado, potencial químico, ecuación fundamental, trayectoria, fase, etc., centrándose en los estados de equilibrio y no en los procesos que eran los núcleos de interés de Kelvin, Clausius y Planck, caracterizando a estos estados por variables de estado como temperatura, volumen, presión, energía, potenciales químicos, entropía. Escribe:

“Las propiedades termodinámicas de un fluido están determinadas por las relaciones que existen entre el volumen, presión, temperatura, energía y entropía de una masa dada de un fluido en un estado de equilibrio termodinámico. Lo mismo es válido para un sólido [...] todas las relaciones existentes entre estas cinco cantidades para cualquier sustancia (tres relaciones independientes) puede ser deducida de la sola relación existente para la sustancia entre el volumen, la energía y la entropía. Esto puede ser hecho por medio de la ecuación general $dU = T dS - p dV$ ”, estableciendo por primera vez dicha ecuación.”

Su habilidad estuvo en asociar la termodinámica con la mecánica estadística de un modo diferente a lo hecho por Boltzmann previamente. En 1901, incorpora la Mecánica estadística como soporte básico de toda la teoría termodinámica (y no solo para los gases ideales) como habían desarrollado Maxwell y Boltzmann. Con su Teoría de Ensamblés, Gibbs da una definición clara de los fundamentos de la física estadística de los sistemas en equilibrio termodinámico. La idea central de esta teoría consiste en considerar un conjunto muy grande de réplicas (ensambles) de un sistema macroscópico, en donde cada réplica se encuentra en un estado microscópico diferente pero compatible con el estado termodinámico de dicho sistema. A cada estado microscópico se le asigna entonces una cierta probabilidad, y las propiedades termodinámicas se determinan calculando los valores promedio de las cantidades microscópicas adecuadas.

En 1902 publica su libro *Principios elementales de Mecánica Estadística*, en el que retoma el trabajo de Boltzmann de 1877, con la diferencia de que, en lugar de considerar al gas constituido por moléculas en permanentes choques, partió del espacio de fases y trabajó con una función de distribución de puntos en ese espacio. En cierto instante de tiempo (t) cada punto en el espacio de fases es una copia del sistema estudiado, sujeto a determinadas condiciones macroscópicas. Esta es la idea de ensamble y se corresponde con el número Ω (número de configuraciones posibles del sistema), considerado por Boltzmann. Examinando la ecuación de Boltzmann, Gibbs discriminó entre gases compuestos por partículas idénticas y aquellos cuyas partículas son diferentes. En su libro ya referido, presentó la siguiente cuestión: *“Si dos fases difieren solamente por el hecho de que partículas semejantes han intercambiado lugar unas con otras, ¿deben considerarse como indistinguibles o sólo en fases diferentes?. Si las partículas son indistinguibles entonces, de acuerdo con el método estadístico, las fases deben ser consideradas idénticas”*. Esta pregunta se conoce como su *paradoja termodinámica* (Basallo, 1999).

“Sean dos fluidos colocados en dos recipientes separados por una barrera. Si los dos fluidos son idénticos y se elimina la barrera no habrá cambio de entropía; si no son idénticos habrá cambio de entropía”.

La solución de esta paradoja pudo darse con la mecánica estadística cuántica. En 1924, Satyendra Nath Bose (1894-1974) y Albert Einstein (1879-1955), mostraron que, para partículas indistinguibles sin límite de número para ocupar cualquier nivel de energía, la expresión de Boltzmann para Ω y corregida por Gibbs debía ser sustituida por otra. Por otro lado, en 1926, Enrico Fermi (1901-1954) y Paul Dirac (1902-1984), observaron que la expresión presentada por Gibbs debía modificarse para el caso de partículas indistinguibles tales que no pudieran ocupar dos el mismo nivel de energía.

Charles Kittel (1973), en su libro *“Física térmica”*, destaca que el desarrollo de la física térmica ha sido claramente determinado a través de dos publicaciones importantes. Una de ellas es la que mencionamos de 1901 escrita por Planck referida a la distribución de la energía de la radiación térmica (la radiación emitida por un cuerpo caliente), a partir del cual se desarrolló la Mecánica Cuántica y el otro es el tratado de Gibbs también ya mencionado. En cuanto a la forma de abordar el estudio de la física térmica, resalta que al traducir los principios de Gibbs al lenguaje de la Mecánica Cuántica, encuentra una exposición clara, razonada y simple de las bases físicas de toda la termodinámica y de toda la mecánica estadística. Abordar el tema desde la mecánica cuántica en lugar de la mecánica clásica no es un impedimento, ya que la primera ofrece una descripción real de la naturaleza, mientras que la mecánica clásica da una descripción que es incompleta en el nivel atómico. La traducción de una forma a otra solamente utiliza un único concepto de mecánica cuántica, el concepto de estado cuántico estacionario de un sistema de partículas.

La idea de estado cuántico estacionario fue concebida por Niels Bohr (1885-1962) y desarrollada en un artículo que publicó en 1913 titulado *“Sobre la constitución de átomos y moléculas”*. Los estados cuánticos estacionarios de un sistema físico de energía constante tienen la propiedad de que la probabilidad de encontrar una partícula en cualquier elemento de volumen es independiente del tiempo y se los define como un estado del sistema tal que todas las propiedades físicas observables son independientes del tiempo. Cuando podemos contar los estados cuánticos que son accesibles a un sistema, conocemos la entropía del sistema ya que la entropía es el logaritmo del número de estados accesibles. Y a partir de la misma se deduce la temperatura, la presión, el potencial químico, el momento magnético y demás funciones de la física térmica.

2.1.5. Carathéodory. La perspectiva axiomática

Una tercera perspectiva a tener en cuenta en el análisis del significado institucional surge de los trabajos del matemático griego Constantin Carathéodory (1873-1950), quien se planteó el problema de encontrar un enunciado del segundo principio independiente de motores y máquinas, mediante una deducción matemática, que condujese a la existencia de una función entropía que satisfaga a la ecuación: $\delta Q_R = T \cdot dS$. Dedujo la existencia de una función entropía y un factor integrante relacionado con la temperatura Kelvin⁴. Un primer artículo, que publicó en 1909 sentó las bases de la termodinámica axiomática.

Hay distintas maneras de pensar la segunda ley de la termodinámica desde el punto de vista axiomático. Recordemos que Clausius en su enunciado de la segunda ley de la termodinámica habla de la imposibilidad de transmitir calor de una fuente a otra de mayor temperatura. El hecho empírico en el que se basó es que el calor es conducido desde un objeto caliente a otro frío. Kelvin y Planck consideraron la limitación de la conversión de calor en trabajo en el sentido de que es necesaria una fuente fría para que una máquina térmica produzca trabajo, cediendo a ella calor. Esta afirmación surge del hecho empírico de que la conversión de calor en trabajo por procesos cíclicos no es perfectamente eficiente. Caratheodory a partir de la matemática afirmó la existencia de una función de estado denominada entropía, que indica si un proceso se produce de forma espontánea en la naturaleza y también afirma la irreversibilidad de algunos procesos adiabáticos. Estas son diferencias importantes que caracterizan el enfoque axiomático.

Según Pogliani y otros (2000), la matemática del tratamiento axiomático se centra alrededor del comportamiento geométrico de una cierta ecuación diferencial, conocida como Pfaff, y sus soluciones y como resultado de eso, Caratheodory fue capaz de obtener una termodinámica puramente formal.

Caratheodory enuncia un formalismo matemático riguroso y diferente. En palabras de Uffink (2001) fue el primero que obtuvo una formulación rigurosa del Segundo Principio. El núcleo central fue desarrollar una teoría de modo tal que la segunda ley de la termodinámica proporcione una característica de la estructura matemática del espacio de estados.

Como señalan Moulines (1990) y Uffink (2001), la visión de Carathéodory en el campo de la termodinámica apuntó a la construcción de una teoría de estados en equilibrio independiente de los procesos. Ideó la termodinámica como constituida como una teoría de estados de equilibrio termodinámico en lugar de procesos cíclicos. Esa es una característica general los desarrollos axiomáticos.

Un sistema termodinámico está descrito por un espacio Γ consistente de sus posibles estados, los cuales están representados por n variables de estado. Supone que este espacio de estados puede ser representado como un subconjunto de un espacio n dimensional en el que estas variables termodinámicas de estado sirven como coordenadas. Admite que el espacio de estados está constituido por la topología euclidiana estándar aunque las propiedades métricas del espacio no juegan ningún papel en la teoría (Uffink, 2001). Estableció una distinción entre coordenadas que llamó térmicas, como la temperatura y la energía, y coordenadas de deformación, como el volumen. De su desarrollo, dice Uffink, parece desprenderse que las primeras son las apropiadas para describir estados de equilibrio y las segundas para describir sistemas en estados de no equilibrio.

El concepto fundamental en Carathéodory está en la noción de accesibilidad y en la relación entre parejas de estados s y t con $s < t$, que representa si el estado t puede ser alcanzado a partir del estado s en un proceso adiabático.

Principio de Caratheodory:

⁴ Zemansky. Calor y Termodinámica. Ed. Aguilar, 1970.

“En cada vecindad abierta U_s (contenida en el espacio de todos los estados, Γ), de un estado s arbitrariamente escogido, existen estados t tales que para una vecindad abierta U_t de t , todos los estados r dentro de U_t no pueden ser alcanzados adiabáticamente a partir de s ”. En las proximidades de todo estado de equilibrio hay estados de equilibrio inaccesibles adiabáticamente desde él.

Caratheodory fue el primero en introducir el concepto de temperatura empírica, antes del tratamiento del primer y segundo principio de la termodinámica, llamando a ese principio empírico Ley Cero de la Termodinámica. Su introducción al primer principio es de mayor rigor que la planteada por otros desarrollos y proporciona un formalismo matemático riguroso y diferente.

La propuesta vertida por Caratheodory, asume la existencia de la entropía como una función de estado. A partir de ello se deduce la existencia de temperatura termodinámica y la presión termodinámica. El principio de Carathéodory, que es su propia versión de la segunda ley de la termodinámica, no implica el aumento de la entropía cuando el trabajo se realiza en condiciones adiabáticas, dándole sentido a los conceptos que construye, no a través del empirismo sino a través del formalismo matemático.

El tratamiento axiomático inventado por Carathéodory no tuvo mucha repercusión hasta que, en 1921, Max Born (1882-1970) escribió tres importantes artículos sobre el mismo. Después de esto, la termodinámica axiomática llamó la atención de otros físicos de la época, en particular de Alfred Landé (1888-1975); Planck; Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) y Wolfgang Pauli (1900-1958), quien reconoció y también criticó el trabajo de Carathéodory.

Hans Adolph Buchdahl (1919-2010), publicó un libro sobre termodinámica en que utilizó las ideas de Caratheodory y una formulación sencilla de las mismas fue publicada en un artículo del American Journal of Physics en 1949. Pogliani y Berberan Santos (2000) subrayan que autores de la talla de Pippard (1957), Turner (1960), Sears (1963), y Landsberg (1964) publicaron interesantes trabajos sobre termodinámica desde el punto de vista axiomático y que este último autor, en 1956, publicó un detallado desarrollo del método axiomático de Caratheodory.

Planck, en 1926, critica el método de Carathéodory por su alta abstracción y por no hacer ninguna referencia al movimiento perpetuo de segunda especie, planteando que el principio de Carathéodory es esencialmente una proposición local, muy débil entonces para garantizar la existencia de una función de entropía global. Obras especializadas continuaron con el método axiomático durante las décadas de 1970 y 1980.

Laszlo Tisza (1907,2009), publica “Termodinámica generalizada” en 1966 y “Termodinámica en un estado de flujo” en 1970, trabajos donde profundiza el lado axiomático de la termodinámica y propone un tratamiento axiomático de la física.

Tres autores publicaron en el American Journal of Physics, los artículos: *Una versión simplificada de la termodinámica de Caratheodory* (Marshall, 1978); *El centenario de Born. Observaciones sobre la termodinámica clásica* (Landsberg, 1983) y *Trabajo y calor en la luz de laser* (Laufer, 1983). Marshall propone un tratamiento que no hace uso de la teoría de las Pfaffians, Laufer aplica el método de Caratheodory a la interacción del láser con la materia y Landsberg aporta ideas sobre la geometrización de la termodinámica con aplicaciones del método axiomático a la tercera ley de la termodinámica.

Mario Bunge (Bunge, 1978), critica el método de Caratheodory, diciendo que la formalización no es deseable sino después de un período de crecimiento, contrastación y crítica de la teoría natural dada, es decir, sólo cuando se tiene por seguro que la teoría es una buena aproximación. La formalización prematura puede ser peligrosa, porque sugiere que la teoría

está realmente terminada y, además, apoyada por la matemática. Este fue de hecho el efecto de la axiomatización de la termodinámica por Carathéodory⁵.

2.1.6. Otras perspectivas

En 1906, Walther Hermann Nernst (1864-1941) enuncia el llamado Tercer Principio de la Termodinámica, como una consecuencia de la entropía estadística de Boltzmann y ese mismo año aparece la teoría de las fluctuaciones de Smoluchowski y Einstein.

El estudio de los fenómenos termoeléctricos iniciados por Kelvin, la conducción del calor, la teoría de difusión de las especies de Darwin, etc. dieron pie a la Termodinámica del no-equilibrio, también llamada de los procesos irreversibles o Termodinámica de la Evolución, la cual adquiere una estructura formal con los trabajos de Lars Onsager (1903-1976) en 1931.

Ilya Prigogine (1917-2003) se dedicó a estudiar la Termodinámica del no equilibrio. En 1947, formula el principio de mínima producción de entropía fuera del equilibrio, y en 1964 introduce la idea de estructuras disipativas para estados alejados del equilibrio. Considera la irreversibilidad como propiedad básica de la naturaleza. En los estados en equilibrio no hay cambio y, por tanto, parece como si el tiempo no transcurriera: el sistema es reversible ya que no puede distinguirse su pasado y su futuro. Lejos del equilibrio el sistema va cambiando, es inestable, va adoptando diferentes configuraciones y aparece la temporalidad (flecha del tiempo) que hace que ese proceso sea irreversible.

Los estudios en el campo de la termodinámica del no equilibrio han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, pudiendo citarse dos escuelas principales: la llamada “generalizada” de Glandsdorff, y la racional con Coleman y Truesdell como representantes más significativos.

Claude Elwood Shannon (1916-2001), publica en 1948 “Una Teoría Matemática de la Comunicación” en el Bell System Technical Journal. Crea un modelo matemático para poder descifrar los sistemas de comunicación por medio de conceptos de probabilidad. El concepto de información es definido en términos estrictamente estadísticos bajo el supuesto que puede ser tratado de manera semejante a como son tratadas las cantidades físicas como la masa y la energía. La información es tratada como una magnitud física y para lograr la caracterización de una secuencia de símbolos es necesario usar la entropía, conocida como “Entropía de Shannon”.

La Teoría de la comunicación de Shanon, pone otra mirada al significado de entropía, pero apartándose de lo puramente termodinámico e incorporando aspectos que tienen que ver con la incertidumbre en la información que se trasmite y se recibe.

2.2 SIGNIFICADO INSTITUCIONAL. Análisis de textos

El recorrido histórico realizado permite observar que no es posible hablar de un significado institucional unívoco de la entropía. Por el contrario, coexisten múltiples definiciones, asociadas a diversas formulaciones del Segundo Principio de la Termodinámica. Así, en un reciente tratado sobre el tema, Capek y Sheehan (2005), distinguen 21 variedades diferentes de entropía, a partir de la manera como la misma es presentada y definida.

Sin considerar aquí toda esa diversidad de manera detallada, nos interesa destacar que la misma se relaciona con la manera como se plantea de modo general la Termodinámica. En ese sentido, podemos reconocer, desde nuestra perspectiva, tres enfoques generales diferenciados:

⁵ M. Bunge. Filosofía de la Física, Barcelona, Ariel, 1978, cap. 8

El enfoque clásico o fenomenológico, sustentado históricamente por su relación con las máquinas de vapor y la conservación de la energía y vinculado al trabajo desarrollado por Sadi Carnot y Rudolph Clausius. Enfatiza sobre la construcción de los conceptos asociados al desarrollo de las máquinas térmicas, es decir a la termodinámica de los ciclos y los rendimientos.

El enfoque microscópico, iniciado por Ludwig Boltzmann, que utiliza métodos estadísticos y plantea las propiedades macroscópicas de un sistema como emergentes del comportamiento colectivo de sus componentes microscópicas

El enfoque axiomático, basado en los trabajos de Constantin Carathéodory, en el que los conceptos, los axiomas que los relacionan y las leyes que de ellos se deducen se presentan formalmente, prescindiendo de sus orígenes históricos, asociados a las máquinas térmicas, y de las hipótesis corpusculares.

Es interesante observar que los textos que suelen utilizarse en la enseñanza universitaria de la Termodinámica exhiben también esa diversidad de enfoques. Algunos textos siguen fielmente uno de ellos, mientras que otros muestran presentaciones híbridas, en las que coexisten más de un enfoque.

Como ejemplos representativos de Las posturas antes mencionadas podemos destacar tres libros muy difundidos: Zemansky (1970), representante del enfoque clásico, Reif (1969), prototipo del microscópico y Callen (1985), característico del axiomático.

Con el propósito de reconocer los aspectos distintivos de cada enfoque, hemos realizado un análisis de esos tres textos, que sintetizamos a continuación. Considerando el marco teórico que hemos adoptado, destacamos en cada caso los elementos que se ponen en juego para caracterizar el objeto entropía e identificamos los componentes del significado: logos (conceptos-definiciones, proposiciones, argumentaciones), praxis (situaciones-problemas y acciones) y lenguaje.

2.2.1 Enfoque clásico

El texto de Zemansky (1970) es una obra ya clásica en el tema, basada fundamentalmente en el estudio de motores prácticos, motores ideales y procesos termodinámicos.

Las transformaciones de calor en trabajo y de trabajo en calor son consideradas básicas para explicar, a través de procesos termodinámicos cíclicos, el funcionamiento del motor térmico y el cálculo de su rendimiento. El motor de combustión interna, la máquina de vapor y la máquina frigorífica ocupan un lugar preponderante en el desarrollo teórico.

La justificación del funcionamiento de las máquinas térmicas y los motores, realizando procesos reversibles e irreversibles, constituidos por ciclos de funcionamiento periódico de la sustancia que trabaja; la existencia de dos focos caloríficos; la entrega y absorción de calor; la realización y entrega de trabajo; y todas las transformaciones realizadas, confluyen para definir el rendimiento del motor térmico y la eficiencia de la máquina frigorífica. Estas consideraciones conducen al Segundo Principio de la Termodinámica, expresado a través del enunciado de Kelvin-Planck para el motor térmico y el enunciado de Clausius para la máquina frigorífica, que se expresan en el texto del siguiente modo:

“Es imposible construir un motor que funcionando según un ciclo no produzca otro efecto que extraer calor de un foco y realizar una cantidad equivalente de trabajo”(p.156).

“Es imposible construir un dispositivo que funcione según un ciclo y no produzca otro efecto que el paso de calor de un cuerpo a otro más caliente”(p. 157).

El abordaje de los fenómenos reversibles e irreversibles ocupa un espacio interesante de discusión, cuyo objetivo es demostrar que, como consecuencia del segundo principio, todos los

procesos naturales son irreversibles y determinar en qué condiciones puede realizarse un proceso reversiblemente. Describir y explicar el comportamiento del motor ideal de Carnot mediante un análisis detallado del ciclo es considerado un elemento clave, ya que del mismo es posible deducir la temperatura absoluta. Mediante un diagrama de trabajo generalizado que considera un proceso reversible, surge el Teorema de Clausius, la formulación matemática del Segundo Principio de la Termodinámica y la definición de Entropía como una función de variables termodinámicas de un sistema, cuyo valor en el estado final menos su valor en el estado inicial es igual a la integral

$$\int_i^f \frac{\delta Q}{T} = S_f - S_i.$$

Reconocidos los aspectos distintivos de este enfoque, identificamos a continuación los elementos del significado en relación al objeto entropía.

Las situaciones problema que son promotoras y contextualizadoras de la actividad están claramente definidas por los procesos espontáneos irreversibles que tienen lugar en la naturaleza. Estas son las situaciones desde donde emerge el objeto entropía para dar respuesta a la imposibilidad de convertir íntegramente calor en trabajo y la imposibilidad de que se produzca un flujo espontáneo de calor de un cuerpo frío a otro más caliente.

La formulación del Segundo Principio de la Termodinámica en términos de Kelvin y de Clausius, el teorema de Carnot, el teorema de Clausius son los principales componentes teóricos o discursivos que integran el logos. En torno a ellos, se desarrollan conceptos centrales como los de rendimiento, eficiencia, ciclo, foco térmico, procesos cuasiestáticos y entropía.

Las acciones (técnicas, operaciones), que constituyen la praxis del significado, incluyen el cálculo de rendimientos de motores térmicos y de eficiencia de máquinas frigoríficas. Comprenden también el cálculo de diferencia de entropía para procesos isotérmicos, isobáricos e isocóricos y su aplicación para el cálculo en procesos irreversibles.

El lenguaje, como elemento constitutivo e intrínseco del objeto entropía, está presente tanto en el logos como en la praxis. El lenguaje matemático utilizado es el correspondiente al análisis matemático de varias variables, tanto en su forma integral como diferencial. Se incluyen representaciones gráficas, como las representaciones cartesianas de procesos y ciclos (diagramas P-V, diagramas T-S). En cuanto al lenguaje icónico, se incluyen esquemas de motores térmicos y máquinas frigoríficas. La figura 2.2, presenta una muestra del lenguaje utilizado.

2.2.2 Enfoque microscópico.

El texto de Reif (1969) es una obra representativa del enfoque microscópico. El volumen Física Estadística está dedicado al estudio de los sistemas macroscópicos compuestos de muchos átomos o moléculas y, a diferencia del texto de Zemansky, plantea los principios fundamentales de la termodinámica, y en particular el significado de la entropía, a partir de la teoría estadística. La situación estadística de mayor simplicidad es, evidentemente, la que es independiente del tiempo, es decir la que considera a un sistema aislado en equilibrio.

La base fundamental del desarrollo es, entonces, el estudio y descripción de un sistema en equilibrio compuesto por muchas partículas, en términos estadísticos. Para hacerlo viable presenta los postulados básicos de la teoría estadística.

“Si un sistema aislado se encuentra con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles, está en equilibrio”(p. 120).

“Si un sistema aislado no se encuentra con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles, no está en equilibrio. Tiende entonces a variar con el tiempo hasta que

alcance finalmente aquella situación de equilibrio en que se encuentre con igual probabilidad en cada uno de sus estados accesibles”(p. 121).

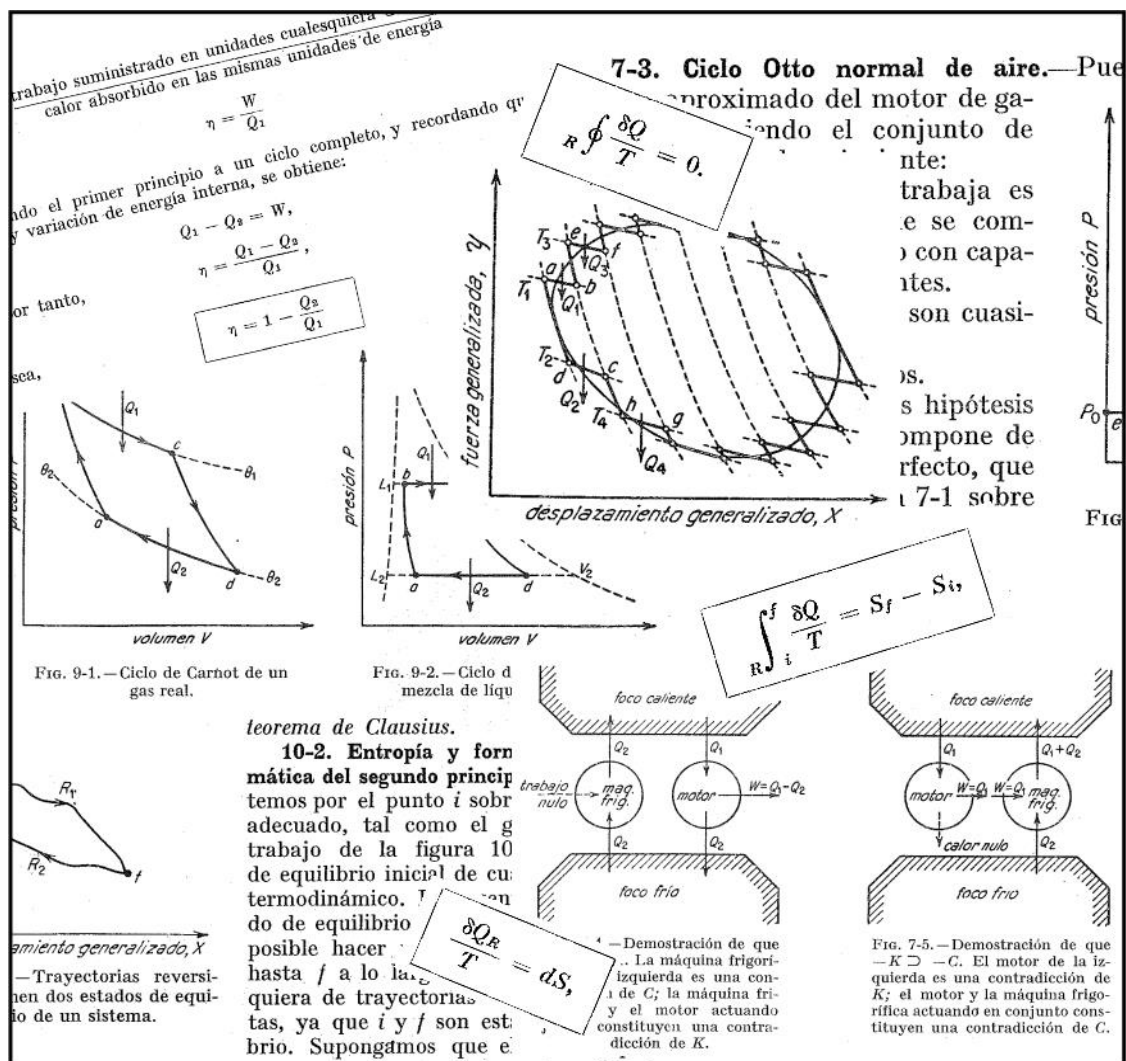


Figura 2.2: Zemansky (1970). Una muestra del lenguaje característico

La comprensión cuantitativa de los sistemas macroscópicos descansa esencialmente, en esta propuesta, sobre consideraciones en las que interviene el recuento de los estados accesibles a los sistemas, convirtiéndose esa idea en la de mayor utilidad. A tal efecto introduce la definición de Ω como el número de estados accesibles a cualquier sistema macroscópico y destaca que dicho número es función de la energía del sistema y aumenta rápidamente con ella.

El análisis de la interacción de dos sistemas con intercambio de calor únicamente, lleva inmediatamente al concepto de entropía, considerado uno de los conceptos fundamentales de la mecánica estadística y la termodinámica.

El análisis desemboca en que el número $\Omega(E)$ de estados accesibles del sistema, mientras se intercambia energía únicamente en forma de calor entre los dos sistemas, estará dado por el producto de cada uno de los estados accesibles componentes del sistema. Dicho producto presenta un máximo muy agudo para cierto valor particular de la energía.

Plantea la conveniencia de utilizar el $\ln \Omega$ e introduce, con el nombre de entropía, la magnitud $S = k \ln \Omega$, que proporciona una medida cuantitativa del grado de aleatoriedad del sistema.

Subrayados los aspectos distintivos de este enfoque, consideramos a continuación los componentes del significado del objeto Entropía, que se ponen en juego bajo esta perspectiva.

La situación-problema característica es la explicación del comportamiento macroscópico de un sistema a partir del análisis del colectivo de partículas que lo componen.

Los componentes teóricos o discursivos están ligados a los postulados básicos de la teoría estadística y, a partir de ellos, el análisis de cómo se conforma el recuento de microestados accesibles. Los conceptos centrales son, en este caso, los de microestado, macroestado, multiplicidad y el de entropía expresada en términos de la multiplicidad.

Los elementos típicos de la praxis (acciones, técnicas, operaciones) están constituidos fundamentalmente por el cálculo de la multiplicidad de diferentes sistemas sencillos, tales como partículas en una caja o sistema de espines.

El lenguaje matemático utilizado es el correspondiente a la teoría de probabilidades y la estadística, con las representaciones gráficas asociadas (tablas de valores, histogramas, gaussianas). El lenguaje icónico incluye esquemas que representan partículas en un recipiente, sistemas de espines, etc. Se incluyen también diversas representaciones gráficas como la de entropía en función de la energía, o la de multiplicidad en función del tiempo. La figura 2.3 presenta una muestra del lenguaje utilizado.

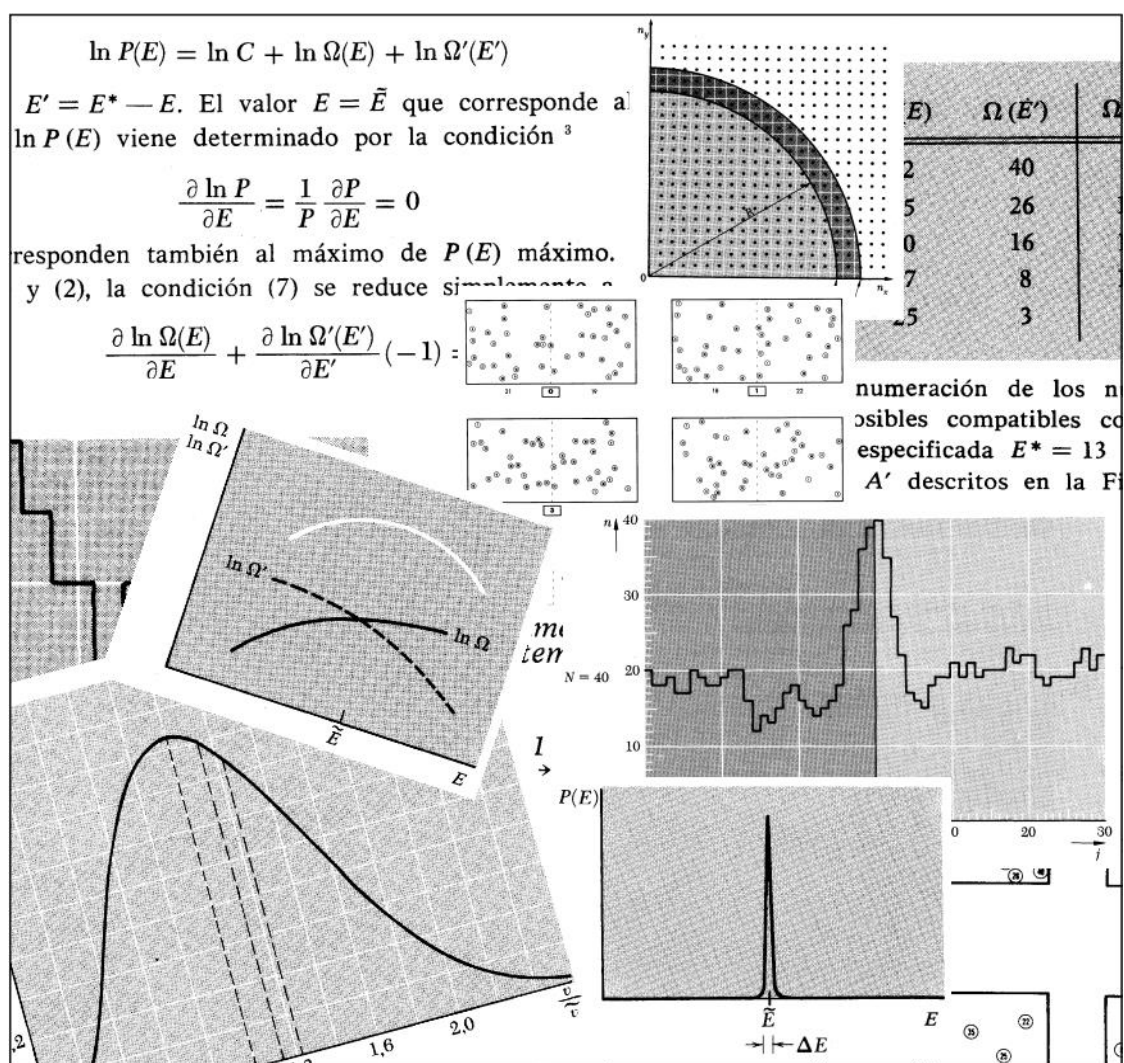


Figura 2.3: Reif (1969). Una muestra del lenguaje característico

2.2.3 Enfoque axiomático.

El texto de Callen (1985) es una obra representativa del enfoque axiomático. El autor renuncia al desarrollo inductivo convencional a favor de un planteamiento basado en postulados, que considera los estados más que los procesos como elementos fundamentales. El planteamiento sigue los lineamientos elaborados por Laszlo Tisza, del Instituto Tecnológico de Massachusetts.

No se incluyen consideraciones sobre el ciclo de Carnot ni sobre la imposibilidad de los móviles perpetuos de diversas especies, ni consideraciones estadísticas respecto al comportamiento microscópico de las partículas que componen el sistema, sino que las funciones de estado, la energía y la entropía se convierten en conceptos básicos.

El autor parte de la observación experimental respecto a que los sistemas aislados tienden en general a evolucionar espontáneamente hacia estados finales simples (equilibrio). Consecuentemente, intenta formular la descripción del equilibrio, de modo que proporcione la base para el desarrollo teórico posterior, enunciando un primer postulado.

Postulado I: *Existen estados particulares (denominados estados de equilibrio) de los sistemas simples que, desde un punto de vista macroscópico, están caracterizados completamente por la energía interna U , el volumen V y los números de moles $N_1, N_2, \dots, N_r$ de los componentes químicos (p. 11).*

Postula la existencia de una función energía, macroscópica y conservativa. Sin embargo, para que esta función energía pueda ser significativa en sentido práctico, debe asegurarse de que es macroscópicamente “controlable y medible”. Demuestra a continuación que efectivamente existen métodos prácticos de medida de la energía; y al hacerlo, llega también a una definición funcional y cuantitativa del calor. Establece sucintamente, la cuestión del control y la medición de la energía del siguiente modo: existen paredes, denominadas adiabáticas, con la propiedad de que el trabajo realizado al hacer evolucionar un sistema adiabáticamente aislado entre dos estados está determinado totalmente por dichos estados, con independencia de todas las condiciones externas. El trabajo realizado es la diferencia de energía interna entre los dos estados. El hecho de que la diferencia de energía entre dos estados cualesquiera sea susceptible de ser medida proporciona directamente una definición cuantitativa del calor: el aporte de calor a un sistema en cualquier proceso (para números de moles constantes) es simplemente la diferencia de energía interna entre los estados final e inicial menos el trabajo realizado en dicho proceso.

Formula entonces lo que considera el problema básico de la termodinámica: la determinación del estado de equilibrio final que se alcanza después de eliminar las ligaduras internas de un sistema compuesto aislado.

Sobre la base de la experiencia con muchas teorías físicas, propone que la forma más económica de expresar el criterio de equilibrio es en términos de un principio extremal. Esto es, que los valores de los parámetros extensivos en el estado de equilibrio final son simplemente aquéllos que “maximizan” una cierta función. Dicha función es la entropía, que presenta en el siguiente postulado:

Postulado II: *Existe una función (denominada Entropía S) de los parámetros extensivos de cualquier sistema compuesto, definida para todos los estados de equilibrio y que tiene la propiedad siguiente: los valores que toman los parámetros extensivos, en ausencia de ligaduras internas, son aquellos que maximizan la entropía respecto al conjunto de los estados de equilibrio ligados (p. 23).*

La relación que da la entropía como función de los parámetros extensivos es denominada relación fundamental. Plantea que si se conoce la relación fundamental de un sistema particular, toda la información termodinámica imaginable concerniente al sistema puede

deducirse a partir de ella: no queda un solo atributo termodinámico que no esté determinado completa y precisamente.

Destacados los aspectos que distinguen el enfoque axiomático, ponemos en relevancia a continuación los elementos del significado característicos de esta perspectiva.

La situación problema que contextualiza la actividad es la evolución espontánea de los sistemas aislados hacia el estado final de equilibrio. La formulación de la descripción del equilibrio es el problema básico del cual emerge el objeto entropía.

Los componentes teóricos están conformados por los postulados I y II y la relación fundamental de la Entropía como función de los parámetros extensivos. Plantea una función variacional que define el estado de equilibrio y se trata de un parámetro extensivo. Los principales conceptos son aquí los de sistema, estado, equilibrio, energía, ligaduras y entropía, entendida esta última como función de los parámetros extensivos, y que está definida para los estados de equilibrio.

Los principales elementos que constituyen la praxis en esta postura (acciones, técnicas, operaciones) incluyen la determinación de las ecuaciones de estado de un sistema a partir de la denominada relación fundamental.

El lenguaje matemático utilizado es el del cálculo diferencial e integral en varias variables y las representaciones gráficas asociadas con él (por ejemplo, gráficas de entropía en función de los parámetros extensivos, y representación, en dichas gráficas, de procesos particulares). Las representaciones icónicas, tipo esquemas o imágenes ilustrativas están prácticamente ausentes en el texto. Una muestra del lenguaje utilizado se presenta en la figura 2.4.

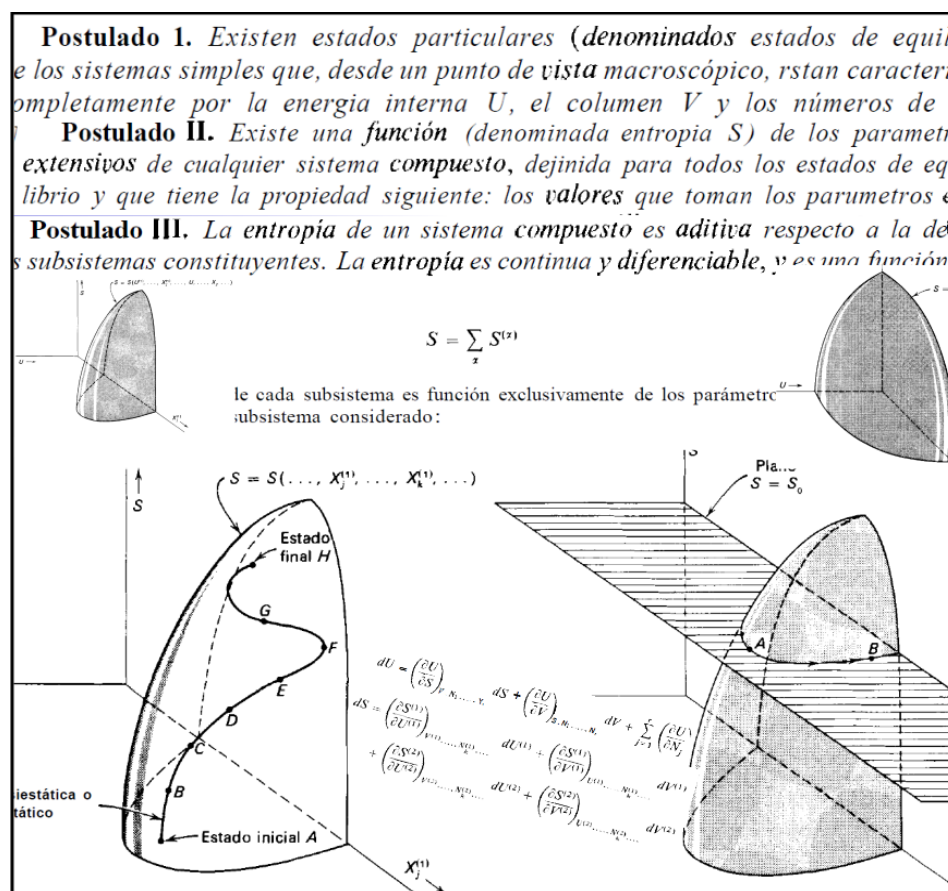


Figura 2.4: Callen (1985). Una muestra del lenguaje característico

2.2.4 Comparación de las presentaciones

Una síntesis de las tres perspectivas analizadas se muestra en la Tabla I. Se destacan en cada enfoque los componentes del significado. Las situaciones-problemas prototípicas de los tres enfoques son los procesos espontáneos e irreversibles abordados con diferentes matices. En cada enfoque se plantean además situaciones-problemas básicas.

Los tres enfoques presentados están caracterizados por enunciados fundamentales sobre los que se asientan los desarrollos posteriores que identifica cada perspectiva.

ENFOQUE Clásico	ENFOQUE Microscópico	ENFOQUE Axiomático
Argumentación		
Empírico fenomenológico	Probabilístico estadístico	Formal Axiomático
Situaciones- Problemas		
Procesos irreversibles espontáneos Rendimiento del motor térmico / Rendimiento del motor de Carnot / Eficiencia de la máquina frigorífica.	Partículas en una caja / Tirada de monedas /Modelo microscópico del Gas Ideal / Sistema de N espines en campo magnético externo.	Evolución espontánea de un sistema hacia el equilibrio
Acciones y Técnicas		
Cálculo de rendimiento y de eficiencia. Cálculo de entropía en procesos cuasiestáticos.	Cálculo de Ω . Cálculos de probabilidades.	Determinación de ecuaciones de estado de un sistema a partir de la relación fundamental.
Conceptos Clave		
Rendimiento. Eficiencia. Ciclo Foco térmico. Procesos cuasiestáticos. Entropía: Existe una función de las variables termodinámicas de un sistema cuyo valor en el estado final menos su valor en el estado inicial es igual a la integral $R \int_i^f \frac{\delta Q}{T}$ Esta función se denomina Entropía y se designa por S.	Multiplicidad. Microestados. Macroestados. Equilibrio Entropía: La Entropía S de un sistema está relacionada con el número Ω de estados a que es accesible y viene dada por $S = k \ln \Omega$.	Paredes y ligaduras. Parámetros extensivos. Función variacional que define el estado de equilibrio. Entropía: Entropía como función de estado fundamental para describir un sistema termodinámico

Enunciados Fundamentales

“Ningún motor que funcione entre dos focos caloríficos dados puede tener un rendimiento superior al de un motor de Carnot que funcione entre los dos mismos focos” “Es imposible construir un motor que, funcionando según un ciclo, no produzca otro efecto que extraer calor de un foco y realizar una cantidad equivalente de trabajo” “Es imposible construir un dispositivo que funcione según un ciclo y no produzca otro efecto que el paso de calor de un cuerpo a otro más caliente”	“Un macroestado de un sistema en equilibrio puede caracterizarse por una magnitud S (llamada Entropía) definida como $S = k \ln \Omega$” “El número de estados accesibles a un sistema, o su Entropía $S = k \ln \Omega$ puede considerarse como función de una serie de parámetros macroscópicos ($y_1, y_2, \dots, y_n$). La probabilidad P de hallar el sistema en una situación caracterizada por valores particulares de sus parámetros, es proporcional al número de estados Ω accesibles al sistema en estas condiciones” “La situación de equilibrio de un sistema aislado está caracterizada por valores de sus parámetros que hacen $S = \text{máximo}$”	“Si se conoce la relación fundamental de un sistema particular, toda la información termodinámica imaginable concerniente al sistema puede deducirse a partir de ella”. “El problema básico de la termodinámica es la determinación del estado de equilibrio final que se alcanza después de eliminar las ligaduras internas de un sistema compuesto aislado”. “En las proximidades de todo estado de equilibrio hay estados de equilibrio inaccesibles adiabáticamente desde él”
--	---	--

Lenguaje

Lenguaje matemático integro-diferencial. Representaciones gráficas de ciclos y procesos; esquemas de máquinas térmicas $\eta_i = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ $\int_R^f \frac{\delta Q}{T} = S_f - S_i$	Lenguaje matemático estadístico. Histogramas. Gráficos de $\ln \Omega$ en función de E. Gráficos de $\Omega/\Omega_{\text{total}}$ en función de n/N. $S = k \ln \Omega$ $\Omega = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_i! \dots}$	Lenguaje matemático integrodiferencial en varias variables. Representaciones en el espacio de las fases: hipersuperficies y curvas asociadas a estados y procesos, $\left(\frac{\partial S}{\partial U} \right)_{V, N_1, \dots, N_r} > 0$
---	--	---

Tabla 2.1: Comparación de las diferentes perspectivas

El enfoque clásico no se caracteriza por mencionar los fenómenos de los procesos cercanos al equilibrio y tampoco menciona la evolución en el tiempo, sin embargo un cálculo típico predominante y destacable es la determinación de los cambios de Entropía en procesos reversibles e irreversibles.

El desarrollo del enfoque que denominamos axiomático está centrado en los procesos cercanos al equilibrio y los postulados de la teoría hacen la diferencia de la forma de expresar el Segundo Principio de la Termodinámica en la forma tradicional. La existencia del equilibrio es esencial para definir las cantidades macroscópicas termodinámicas. Zemasnky destaca los puntos inicial y final de equilibrio; mientras que Callen se refiere a los procesos cercanos al equilibrio.

En el enfoque microscópico el sistema termodinámico está definido desde el comienzo como un sistema con muchos grados de libertad por lo que el método estadístico es presentado como relevante desde el comienzo, para llegar a la noción de Entropía relacionándola con el concepto de probabilidad. El autor destaca la necesidad de definir un enlace con los procesos cercanos al equilibrio y analiza detalladamente las fluctuaciones.

Otra característica relevante es el lenguaje utilizado por cada uno de los autores para describir los fenómenos. En el enfoque clásico los esquemas de los motores térmicos, los esquemas de las máquinas frigoríficas y la representación gráfica de ciclos constituyen un ícono de esa literatura. En el enfoque microscópico, al ser un enfoque estadístico basado en las propiedades de un modelo discreto, es habitual encontrarse con figuras alegóricas a partículas en un recipiente, representaciones gráficas de curvas Gaussianas y diagramas de barras. En el enfoque axiomático las hipersuperficies y las curvas trazadas arbitrariamente desde un estado inicial a un estado final acercan al lector a los procesos cuasiestáticos en donde se observa la sucesión de estados de equilibrio diferenciándolos de los procesos reales donde se manifiesta una sucesión temporal de estados de equilibrio y desequilibrio.

Las expresiones matemáticas utilizadas para describir el concepto de entropía están basadas en ecuaciones integrodiferenciales en la descripción axiomática; mientras que en la descripción microscópica la matemática de las probabilidades y el cálculo de valores medios tienen especial preponderancia. En la descripción fenomenológica prima el cálculo integral y diferencial.

En la figura 2.5, se representa la configuración epistémica asociada al concepto de Entropía según las tres perspectivas puestas en juego.

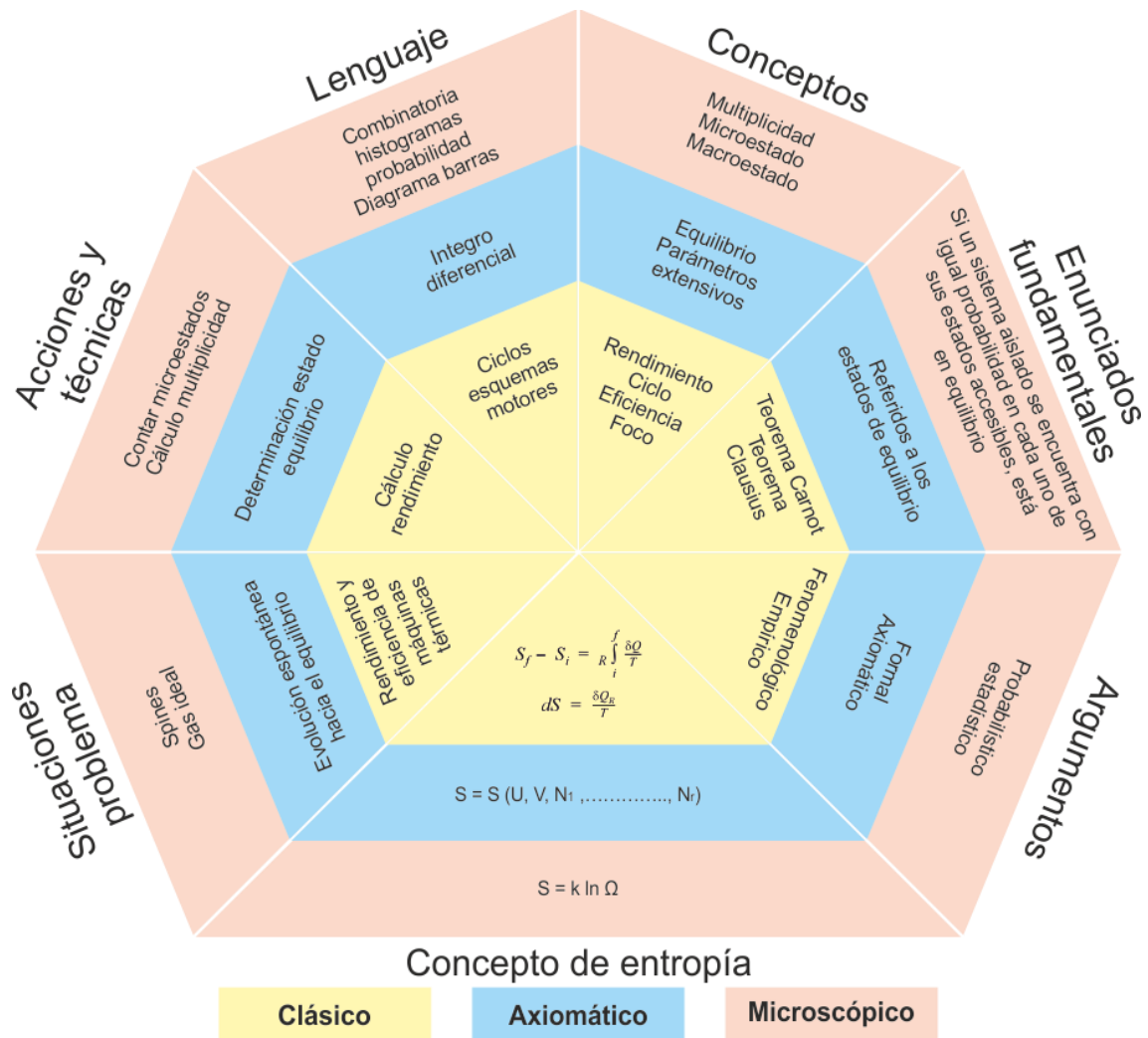


Figura 2.5: Configuraciones epistémicas asociadas al concepto de entropía según las tres perspectivas analizadas

2.2 SIGNIFICADO INSTITUCIONAL LOCAL. Análisis del contexto

El concepto de entropía es enseñado en el ciclo básico de las carreras de ingeniería de la FCEIA en la asignatura Física II. Dicha asignatura es de régimen cuatrimestral y tiene una carga horaria de 7 horas semanales. El programa contempla el desarrollo de Termodinámica y Ondas. Se destinan tres (3) horas semanales para los temas de termodinámica.

En ese bloque horario, la mitad de la clase se destina a teoría y la otra mitad a la resolución de problemas. Las actividades de laboratorio se programan por separado, fuera del horario de clases habitual. Se realizan cinco trabajos prácticos de laboratorio, de los cuales dos son demostrativos.

Los docentes de Física, en un esfuerzo por implementar alternativas educativas para renovar cualitativamente la enseñanza de esta asignatura, han promovido cambios en el dictado de Termodinámica. Uno de los cambios fue abordar la enseñanza del tema desde un enfoque microscópico, adoptando como bibliografía de referencia el texto: “Física Estadística y Termodinámica”, cuyo autor es Bernard Jancovici, y apuntes elaborados por los propios docentes.

Para caracterizar el significado institucional local, hemos tenido en cuenta el texto mencionado y la manera como los docentes de la asignatura presentan el tema en sus clases.

2.3.1 Análisis del libro de texto

El texto de Jancovici está dividido en cinco capítulos, distribuidos en dos cuadernillos.

En el primer cuadernillo el autor caracteriza un sistema termodinámico y define el estado de equilibrio del mismo cuando las variables macroscópicas alcanzan valores fijos bien determinados. Aborda el gas ideal a través de la teoría cinética. La energía interna es presentada como la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas que constituyen el sistema y los conceptos de calor y trabajo, como manifestación de los constituyentes microscópicos de la materia.

En el capítulo III, la entropía y segundo principio de la termodinámica son abordados desde el enfoque microscópico. El autor argumenta que la evolución natural de los sistemas físicos macroscópicos se realiza en general en un sentido privilegiado, mientras que la evolución inversa no se produce espontáneamente. Expone diferentes ejemplos de procesos naturales espontáneos. Menciona que, durante su evolución, estos procesos cumplen con el primer principio de la termodinámica y el proceso inverso también: el primer principio no dice absolutamente nada acerca del sentido de evolución de los sistemas. De esto se ocupa el segundo principio, que el autor propone abordar microscópicamente.

Considera que un sistema en un determinado estado macroscópico corresponde a varios estados microscópicos y llama entropía del sistema a la cantidad $S = k \ln \Omega$. El número de estados microscópicos correspondiente a un determinado estado macroscópico se denomina Ω . Considera, en principio que es posible contarlos y enuncia la hipótesis fundamental de la mecánica estadística: *“Todos los estados microscópicos accesibles a un sistema aislado tienen la misma probabilidad”* (p. III-2).

Ilustra sus consideraciones con el estudio de un sistema simple: un conjunto de N átomos, cada uno de ellos con espín $1/2$, y con un momento magnético μ . Calcula Ω para ese sistema.

Demuestra que Ω , y entonces también S , alcanzan un valor máximo, que calcula utilizando la expresión de Stirling (la demuestra en el apéndice IV), válida para grandes valores de x .

Muestra que el sistema en su evolución se dirige hacia el estado macroscópico de equilibrio, es decir de mayor Ω , compuesto por los estados microscópicos que le corresponden. Generaliza las consideraciones anteriores y afirma que, para los mismos valores de la energía interna y de

los parámetros externos, los estados fuera del equilibrio se corresponden con un menor número de estados microscópicos y, por ende, de menor entropía. Muestra que la entropía es una magnitud extensiva, que tiene la propiedad de aditividad.

Presenta la entropía de un sistema en equilibrio como función de la energía interna y de los parámetros externos. A partir de esta consideración define temperatura termodinámica y presión termodinámica y obtiene la expresión de la identidad termodinámica.

Aborda seguidamente el cálculo de Ω y la entropía del gas ideal, calculando el aporte del número de configuraciones posibles de las posiciones de las partículas y el número de configuraciones posibles de las velocidades. Describe las características generales de la entropía como función de estado y como función creciente de la energía.

En el segundo cuadernillo, el autor analiza la distribución de Maxwell-Boltzmann y la Equipartición de la energía.

2.3.2 Análisis de las clases

En la asignatura se destinan tres clases (9 horas de clase en total) a trabajar los conceptos de entropía y el segundo principio de la termodinámica. Hemos asistido a dichas clases en dos de las cuatro comisiones que funcionan simultáneamente, a cargo de dos docentes diferentes, que denominamos docente A y docente B. El esquema seguido por los docentes es más o menos similar y se ordena, en términos generales, según la secuencia del texto de Jancovici.

Ambos docentes inician el tema entropía comentando ejemplos de la vida cotidiana para mostrar procesos espontáneos y procesos irreversibles. Entre los diferentes ejemplos que mencionan, hacen referencia a la dilución de una gota de tinta en agua; un bloque empujado sobre un piso con rozamiento; un globo inflado; dos recipientes conteniendo uno de ellos agua caliente y el otro agua fría, en contacto y aislados del medio ambiente. Mencionan que la tendencia hacia el equilibrio y el hecho de que ciertos procesos se producen en un sentido y no en otro, constituyen la base del Segundo Principio de la Termodinámica, que intentarán explicar desde lo microscópico.

En la primera clase se presentan las nociones de microestado, macroestado, multiplicidad y entropía como $S = k \ln \Omega$.

En la segunda clase, a partir de analizar la situación de dos recipientes con gases ideales monoatómicos a distinta temperatura y en contacto térmico se definen la temperatura termodinámica, la presión termodinámica hasta arribar a la identidad termodinámica y la articulación entre el enfoque microscópico y macroscópico de la entropía.

En la tercera clase se trabaja la entropía de un gas ideal clásico monoatómico, arribándose a la expresión:

$$S = k \left[N \log V + \frac{3N}{2} \log U + \log C \right]$$

Para nuestro trabajo, nos interesa particularmente la manera como los docentes presentan y desarrollan la noción de entropía de Boltzmann. Esto corresponde exclusivamente a lo trabajado en la primera clase.

En el cuadro 2.1 se sintetiza la secuencia epistémica seguida por el docente A en dicha clase. Salvo ligeros matices, la presentación del docente B es similar.

Como puede observarse, en ella se introduce la multiplicidad a partir de un ejemplo de bolitas en una caja y luego se la calcula para el caso de un sistema de espines, destinando un tiempo considerable a obtener la expresión de su valor máximo.

La intención de los docentes es asociar el estado de multiplicidad máxima con el equilibrio y mostrar que la representación gráfica de $\Omega(n)$ en función de n (número de espines up) muestra

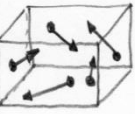
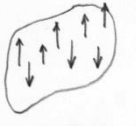
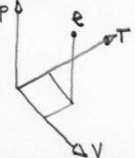
un pico muy agudo con un máximo para $n=N/2$ (igual cantidad de partículas con espín up y con espín down). Si bien la gráfica se presenta, la explicación realizada se hace muy rápidamente.

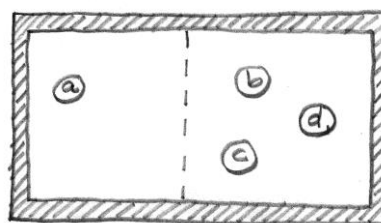
Después de presentar a partir de esto la noción de entropía, se comenta muy brevemente que los sistemas evolucionan hacia el estado de Ω máximo y por ende de S (entropía) máximo. Esto se acompaña con una representación gráfica y se hace una ligera mención a la existencia de fluctuaciones.

En definitiva, en una sola clase se incorporan muchos conceptos nuevos para los estudiantes (microestado, macroestado, multiplicidad, entropía, equilibrio, fluctuaciones, irreversibilidad) que sientan las bases para el trabajo en las dos clases posteriores, pero que no son retomados adecuadamente en las mismas.

De hecho, la segunda clase avanza ya en establecer un puente entre estas nociones microscópicas y la perspectiva macroscópica del segundo principio. Y si bien en la tercera clase se recuperan los conceptos de macroestado, microestado y multiplicidad, en el contexto del cálculo de la entropía de un gas ideal, se destina todo el tiempo a explicar un desarrollo matemático sin mostrar una adecuada relación de este caso con los ejemplos sencillos tratados originalmente.

Por otra parte, si bien en el ejemplo de partículas en una caja se mencionan las probabilidades asociadas a diferentes configuraciones, esto se hace muy rápidamente, sin tener en cuenta que muchos alumnos no poseen conocimientos previos de probabilidad y estadística.

	GAS IDEAL	SÓLIDO PARAMAGNÉTICO
DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA		
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA		



Cuatro moléculas en un recipiente ($N_{izq} = 1$)

Descripciones microscópicas y macroscópicas

N_{izq}	MOLECULAS A LA IZQUIERDA	Ω
4	(a)(b)(c)(d)	$1 = C_4^4 = \frac{4!}{4!0!}$
3	(a)(b)(c) (a)(b)(d) (a)(c)(d) (b)(c)(d)	$4 = C_4^3 = \frac{4!}{3!(4-3)!}$
2	(a)(b) (a)(c) (a)(d) (b)(c) (b)(d) (c)(d)	$6 = C_4^2 = \frac{4!}{2!(4-2)!}$
1	(a) (b) (c) (d)	$4 = C_4^1 = \frac{4!}{1!(4-1)!}$
0		$1 = C_4^0 = \frac{4!}{0!(4-0)!}$

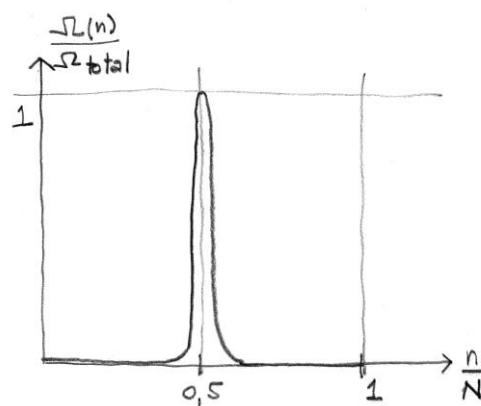


Figura 2.6: Esquemas y gráficos hechos por los docentes en su transposición didáctica

Trayectoria epistémica de la primera clase (Docente A)

Motivación

Diversos ejemplos motivadores son expuestos para presentar el Segundo Principio de la Termodinámica. Este principio es presentado como aquel que hace referencia a la direccionalidad de los procesos y la tendencia espontánea a un estado de equilibrio.

Descripciones microscópicas y descripciones macroscópicas.

Toma como ejemplo el aire que ocupa una habitación cuyas partículas componen un sistema macroscópico y detalla una “descripción microscópica” a aquella que puede describirse exhaustivamente por el movimiento y las posiciones de cada una de las partículas que lo componen y el estado conocido con ese grado de minuciosidad de descripción lo llama “estado microscópico”. Detalla que una descripción macroscópica de ese aire solo requiere conocer magnitudes que caracterizan ciertos comportamientos colectivos de las partículas que componen el sistema, caracterizados por valores definidos de esas variables macroscópicas. Resalta que a cada estado microscópico le corresponde un único estado macroscópico y a un estado macroscópico le corresponden en general muchísimos estados microscópicos.

Cálculo de Ω

Define Ω , número de estados microscópicos que corresponden a un dado estado macroscópico y plantea que Ω es una función de estado.

Imagina que tiene un recipiente dividido en dos partes iguales por un tabique. En el recipiente hay inicialmente del lado izquierdo un gas “de juguete” compuesto por 4 moléculas distinguibles. Un observador saca el tabique y pone en funcionamiento un instrumento que sólo detecta el número de moléculas que están en la mitad izquierda del recipiente, por lo que un “estado macroscópico” estará representado por el número de moléculas que están a la izquierda.

Analiza de cuantas maneras microscópicas distintas se puede realizar cada estado macroscópico (Ω). Particularmente, calcula la probabilidad de que todas las partículas se encuentren en la mitad izquierda de la caja. Hace esto considerando un sistema compuesto por una, dos, tres y cuatro partículas y generaliza para un sistema de muchas (del orden del número de Avogadro). Calcula Ω contando las situaciones posibles y corroborando con el cálculo combinatorio.

Destaca la imposibilidad de contar directamente los estados microscópicos que corresponden a cada macroestado cuando aumenta el número de moléculas y generaliza el cálculo de Ω considerando combinaciones de N moléculas tomadas en grupos de n moléculas en la mitad izquierda de la caja. Observa que el estado macroscópico que se realiza con el mayor número de estados microscópicos es aquel en el que hay igual número de moléculas en las dos mitades del recipiente.

Discute a continuación el caso de un sólido paramagnético (espines up-down en presencia de un campo magnético) y arriba a la expresión de $\Omega(n)$, siendo n el número de espines ubicados hacia arriba:

$$\Omega = \frac{N!}{\left(\frac{N+n}{2}\right)! \left(\frac{N-n}{2}\right)!}$$

Calcula, con ayuda de la expresión de Stirling, el valor máximo de $\Omega(n)$, mostrando que el mismo corresponde a la situación $n = N/2$.

Cuadro 2.1 Trayectoria epistémica de la primera clase (Docente A)

Equilibrio

Representa gráficamente el cociente entre $\Omega(n)/\Omega_{\text{total}}$ en función de n/N (siendo n el número de partículas ubicadas en el lado izquierdo de la caja o el número de espines up, según el caso, y N el número total de partículas o de espines). Explica que $\Omega(n)$ tiene un máximo muy agudo para el estado macroscópico en el que hay igual cantidad de moléculas en las dos partes del recipiente o igual cantidad de espines up que de espines down ($n=N/2$).

Afirma que un estado macroscópico con un número diferente de moléculas en cada parte del recipiente no dura mucho tiempo y el sistema evoluciona hasta alcanzar el estado macroscópico más homogéneo (equilibrio) y permanece en ese estado. Dicho estado corresponde al valor máximo de Ω .

Sólo se espera que haya pequeñas fluctuaciones que serán imperceptibles con los instrumentos de medición usuales y son improbables grandes desviaciones espontáneas del estado con igual cantidad de moléculas de cada lado.

Entropía y Segundo Principio de la Termodinámica

Define entropía como $S = k \ln \Omega$.

Asociado con la discusión previa sobre el comportamiento de Ω , plantea que en todo sistema aislado la entropía crece y permanece constante en un valor máximo.

Establece que esto brinda un modo de plantear el segundo principio de la termodinámica: para todo sistema aislado, el estado macroscópico solo puede evolucionar en el tiempo de manera de aumentar su entropía, $\Delta S \geq 0$.

Este aumento se produce hasta que el sistema alcance espontáneamente el estado de equilibrio termodinámico (entropía máxima).

Cuadro 2.1 (continuación) Trayectoria epistémica de la primera clase (Docente A)

2.3.3 Entropía en el contexto local

Teniendo en cuenta la bibliografía, los apuntes de cátedra y la transposición didáctica docente que hemos analizado, caracterizamos el objeto entropía en el contexto local. Como hemos visto en el capítulo 1, un objeto de conocimiento se caracteriza fundamentalmente a partir de las situaciones-problema de las que emerge y comprende tanto un logo como una praxis.

Desde el punto de vista del logos debemos resaltar que la idea central que aparece en cada una de las referencias con las que contamos, es la argumentación de que es posible comprender el comportamiento termodinámico de un sistema a partir de la hipótesis de considerar el sistema como un conjunto de partículas. El planteo de las hipótesis fundamentales con base en la mecánica estadística permite análogamente pensar y explicar el segundo principio de la termodinámica como una consecuencia del comportamiento de los constituyentes microscópicos de la materia.

Es relevante la información estadística porque permite conocer la probabilidad de que un sistema se encuentre en tal o cual estado macroscópico y permite imaginar que un sistema que se ve en aparente reposo a escala macroscópica evoluciona a escala microscópica y puede ocupar en el transcurso del tiempo diversos estados microscópicos.

Para que esa idea pueda ser interpretada es necesario tratar conceptos y definiciones centrales del enfoque adoptado. Entre ellas se destacan el tratamiento de conceptos tales como microestado, macroestado, configuración y multiplicidad, de modo de definir desde el comienzo entropía como $S = k \ln \Omega$. El análisis del equilibrio y la evolución hacia el equilibrio

conlleva el tratamiento de las fluctuaciones y la explicación sobre la irreversibilidad de los procesos.

En cuanto a los enunciados más importantes destacamos: “Todos los estados microscópicos accesibles a un sistema aislado tienen la misma probabilidad”; “mientras que en su evolución, el sistema se dirige hacia los estados con mayor Ω , la entropía $S = k \ln \Omega$ aumenta”; “la entropía de un sistema aislado (U y los demás parámetros constantes) aumenta y alcanza su máximo cuando el sistema llega al equilibrio”; “en el equilibrio la entropía se puede calcular indistintamente contando los estados microscópicos que corresponden al macroestado de equilibrio o contando sin restricciones todos los estados microscópicos accesibles”.

Desde el punto de vista de la praxis, el significado pone en juego las situaciones problema prototípicas del enfoque, entre las que se destacan como prioritarias y como ejemplos característicos, dos problemas:

Problema 1: Sólido paramagnético. Considera un conjunto de N átomos, cada uno de ellos con espín $\frac{1}{2}$, y con un momento magnético μ . Cada átomo está ubicado en un sitio fijo. La proyección del espín sobre un eje de cuantificación solo puede tener dos valores $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$; la proyección del momento magnético será entonces $+\mu$ o $-\mu$. Calcula Ω y la entropía de dicho sistema.

Problema 2: El cálculo de la entropía de un gas ideal, contando el número de configuraciones posibles para las posiciones de las moléculas y el número de configuraciones posibles para las velocidades y los estados internos de las moléculas. Calcula Ω y la entropía del Gas.

El análisis y resolución de dichos problemas conlleva técnicas y operaciones características del enfoque:

- Contar Ω (el número de estados microscópicos que corresponde a un dado estado macroscópico) para sistemas con pocas partículas.
- Cálculo de Ω utilizando análisis combinatorio
- Cálculo de la entropía a partir de $S = k \ln \Omega$
- Obtención del valor máximo de entropía utilizando la expresión de Stirling.
- Cálculo de la entropía del sólido paramagnético y cálculo entropía de un gas ideal.
- Algoritmo para determinar la entropía del gas ideal dividiendo un volumen en celdas pequeñas de igual tamaño para contar el número de configuraciones posibles para las posiciones de las moléculas.
- Algoritmo para considerar el número de configuraciones posibles para las velocidades en el gas ideal.

Otro aspecto a considerar en la caracterización del significado local del objeto entropía es el lenguaje utilizado, que articula la praxis y el logos. El lenguaje puesto en juego se manifiesta en sus acepciones verbal, formal y gráfico. El lenguaje verbal, si bien incorpora términos específicos y nuevos para los estudiantes, es fundamentalmente coloquial y cotidiano. El lenguaje formal incorpora expresiones de probabilidad y estadística y el gráfico se caracteriza fundamentalmente por las representaciones gráficas de funciones que muestran la evolución de la entropía en función del tiempo y las gráficas de multiplicidad en función del número de partículas. También se incluyen representaciones icónicas de los sistemas sencillos trabajados y tablas con la enumeración de los estados posibles (macroestados y microestados).

A continuación presentamos un esquema de la configuración epistémica local asociada al concepto de entropía.

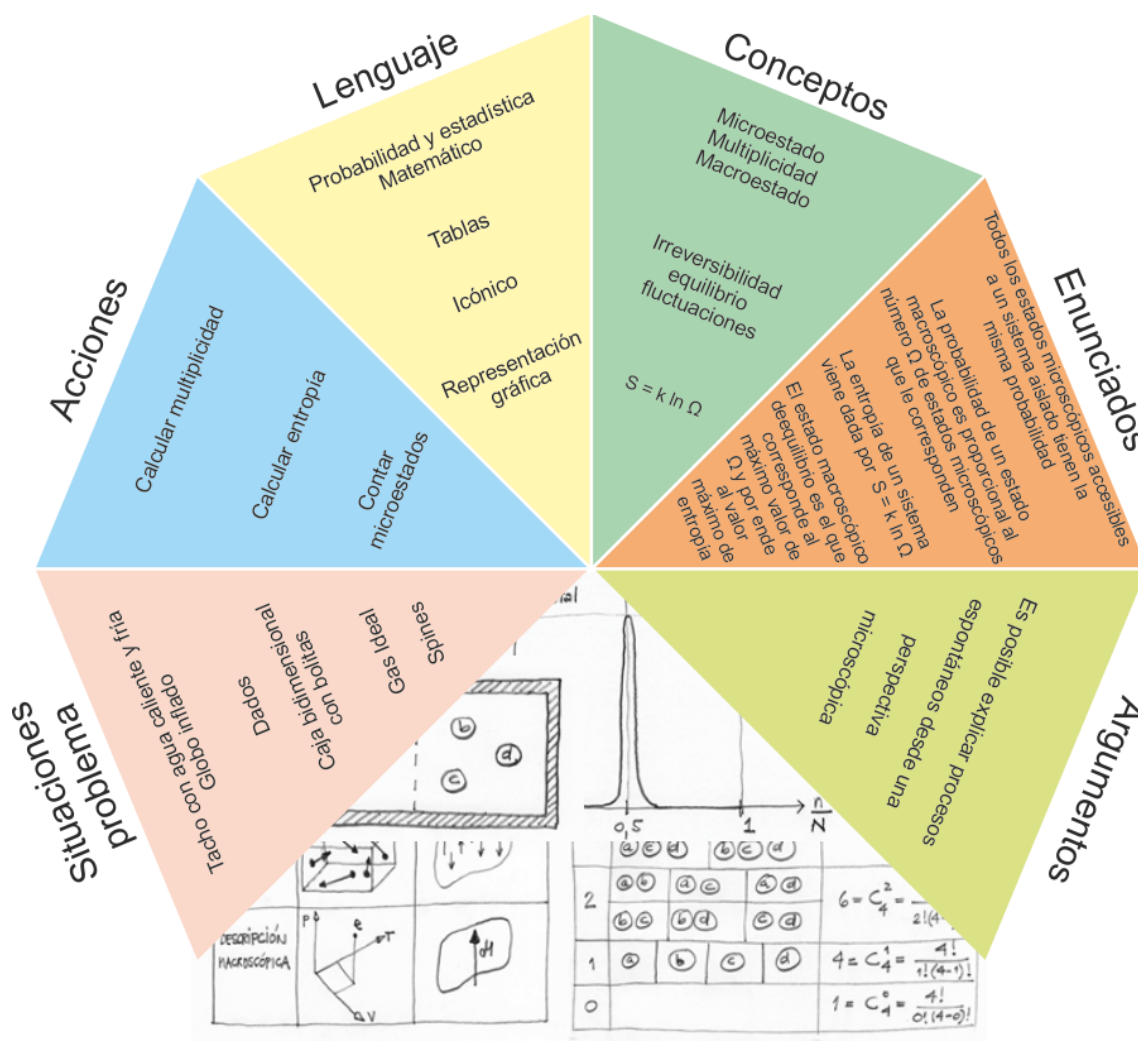


Figura: 2.7 Caracterización objeto local

2.4 SIGNIFICADOS PERSONALES. Concepciones de los estudiantes

A diferencia de otros temas, no son numerosos los artículos que tratan las concepciones alternativas de los estudiantes sobre entropía y menos numerosas aún las investigaciones focalizadas en la perspectiva microscópica.

Es de interés mostrar estudios que han realizado investigadores preocupados por la comprensión de los estudiantes sobre este tópico de física, particularmente en el enfoque citado, aunque también hacemos referencia a las investigaciones realizadas desde el enfoque macroscópico e investigaciones que abordan cómo repercuten las metáforas puestas en juego al tratar de describir e interpretar el concepto de entropía. Se identifican, además una serie de dificultades que tienen los estudiantes para comprender no sólo el concepto de entropía sino también otros conceptos de la termodinámica asociados a la misma.

La población sobre las que se realizaron las investigaciones es muy heterogénea y data desde alumnos de escuelas primarias y secundarias hasta alumnos ingresantes a los profesados de Física, Química y Ciencias Naturales; alumnos universitarios que no tenían nociones previas sobre el tema y alumnos universitarios luego de haber finalizado un curso de termodinámica o alumnos que previamente habían desarrollado temas como energía, calor, temperatura.

Hemos consultado investigaciones realizadas por docentes de las Universidades de Maine (USA); Pune (India); Montreal, Quebec (Canadá); Universidad de San Pablo (Brasil); Universidad de La Laguna (España), entre otras. Varias de ellas se han llevado a cabo en alumnos de cursos

de nivel superior y en cursos introductorios a la Universidad. Lo cierto es que todas ellas en mayor o menor medida arrojan resultados muy diversos, tales como nociones expresadas en torno al desorden o caos, memorización de expresiones de entropía sin ningún significado físico subyacente o respuestas asociadas a experiencias relacionadas con la observación cotidiana de fenómenos, desde caída de una piedra o percibir el olor de las comidas; que no contradicen la intuición pero que a la vez no genera una respuesta crítica y de carácter científico para explicar los fenómenos por parte del alumnado.

2.4.1 Investigaciones sobre los significados personales

A diferencia de otros temas, no son numerosos los artículos que tratan las concepciones alternativas de los estudiantes sobre entropía o sus dificultades en la comprensión del concepto. Particularmente, muy pocos abordan el tema desde una perspectiva microscópica. Del relevamiento realizado, destacamos a continuación los resultados que consideramos más relevantes.

Schultz y Coddington (1981) exploraron entre otras cosas el desarrollo de nociones vinculadas a entropía en niños y adolescentes cuyas edades oscilaban entre los 5 y los 15 años de edad. Estos investigadores presentaron a los niños un experimento donde se les muestra una caja dividida por la mitad por un tabique y de cada lado del tabique se colocan 10 bolitas azules y 10 bolitas verdes pidiéndoles a los niños predecir la distribución de bolitas luego de sacar el tabique divisorio y sacudir la caja muchas veces. Los chicos más pequeños al igual que los adolescentes predicen como resultado una mezcla de las bolitas. Los autores comprueban que, desde temprana edad, los niños desarrollan ideas intuitivas relacionadas con la segunda ley, particularmente en el reconocimiento de procesos irreversibles y la tendencia al equilibrio. La concepción básica de entropía está presente y hacia los 15 años la mayoría predice correctamente la tendencia de un sistema hacia el estado de equilibrio. Sin embargo, las ideas teóricas en las que los estudiantes basan sus afirmaciones son difusas.

Pintó Casulleras (1991) en el marco de su Tesis doctoral ha constatado que los estudiantes catalanes de pregrado de física, al ser interrogados sobre la Segunda Ley, formulan con mayor frecuencia el enunciado de Kelvin –Planck. Algunos mencionan en menor medida el enunciado de Clausius. Al interrogarlos en relación a la vinculación entre la Segunda Ley de la termodinámica y el rendimiento de las máquinas térmicas, y en particular porqué la máquina térmica no puede tener un rendimiento del 100%, se obtienen respuestas que plantean que el calor es irrecuperable o que siempre habrá pérdidas en forma de calor. La autora concluye que las respuestas están basadas en no tener en claro las nociones de calor, trabajo y energía interna, lo que trae como consecuencia la no interpretación de la segunda ley. Al solicitárseles la aplicación de la 2da ley para explicar algunos procesos irreversibles, las respuestas van en la dirección de que las cosas no suceden porque es ir en contra de la segunda ley o sencillamente no relacionan un problema de la mecánica con termodinámica. En algunos casos la irreversibilidad la explican a través de la degradación de la energía. Algunos alumnos lo hacen marcando una “tendencia” al aumento de entropía o una tendencia al equilibrio u homogeneidad, y otros mencionan un aumento del número de microestados accesibles. En la expansión de un gas, recurren más a explicaciones basadas en las propiedades de los gases que referidas a la tendencia de los procesos. En algunos casos, recurren a la idea de desorden. La autora enfatiza que las explicaciones que dan los estudiantes sobre procesos están basadas en conceptos propios de la mecánica más que en los propios de Termodinámica. Para algunos estudiantes, la tendencia al equilibrio es considerada una tendencia al orden y a la disminución de entropía. La tendencia al equilibrio, a la homogeneidad, o a la estabilidad, no es contemplada como tendencias a un estado de mayor número de microestados, sino a uno considerado de mayor desorden. Cuando hablan de tendencia al equilibrio o tendencia a la estabilidad hablan de una evolución hacia una situación permanente sin alteración o cambio y para ellos la 2da ley no hace referencia a estas tendencias.

Kesidou y Duit (1993) destacan que los estudiantes están a menudo centrados en un esquema de causa y efecto: los procesos reales son irreversibles porque no existen causas para invertirlos (una piedra que cae al suelo no vuelve espontáneamente a su altura inicial porque no existe fuerza ascendente presente). Surge de estos estudios que los estudiantes que ingresan a cursos universitarios de física sin haber recibido previamente algunas nociones referidas a entropía y la Segunda Ley, tienen algunas ideas intuitivas sobre equilibrio e irreversibilidad, no basadas en una comprensión del concepto de entropía. Los autores plantean que las dificultades que tienen los alumnos en la comprensión de calor y temperatura constituyen un impedimento para aprender la segunda ley de la termodinámica.

Kulkarni y Tambade (2013), trabajaron con 156 estudiantes de primer año de pregrado en la Universidad de Pune (India), cuyas edades oscilaban entre 17 y 19 años. Los investigadores exploraron las capacidades de los alumnos para: interpretar representaciones verbales en termodinámica; interpretar ecuaciones en termodinámica e interpretar representaciones gráficas. Para ello, diseñaron varios problemas en los que conectaban un estado inicial y un estado final en un diagrama P-V a través de trayectorias adiabáticas e isotérmicas diferentes, con el objetivo de determinar el trabajo realizado por un gas ideal y si se establecía alguna dependencia del trabajo con la trayectoria. Algunas de las respuestas de los estudiantes indicaron que el trabajo realizado por el sistema durante un proceso termodinámico cualquiera se comporta como una función de estado. El 42% de los estudiantes cree que hay un cambio en la energía interna tanto en los procesos isotérmicos como en los procesos adiabáticos. Los autores confirmaron que los estudiantes tienen dificultad para comprender que en un proceso representado por un camino más alto en el diagrama PV genera más trabajo, ya que el área bajo la curva es mayor y percibieron que esta dificultad tiene como consecuencia directa la no interpretación de que para obtener el mayor rendimiento en una máquina térmica, las curvas deben estar lo más separadas posible.

Thomas y Schwenz (1998) investigaron lo que ellos consideran como ideas previas predominantes sobre equilibrio en termodinámica en 16 estudiantes universitarios. De los hallazgos encontrados informan que existe una fuerte tendencia por parte de los estudiantes en creer firmemente que la Segunda Ley de la Termodinámica impone que la entropía del sistema siempre se incrementa, aún en un contexto en el que existen pruebas de que ese no sería el caso. Hay una fuerte tendencia a no aceptar la idea de que la entropía del sistema más alrededores aumenta con una fuerte creencia en la conservación de la entropía total.

Sözbilir (2001) distribuyó cuestionarios a estudiantes turcos de pregrado en química en tres universidades, tanto antes como después de un curso de termodinámica química. Sólo una pequeña minoría de los estudiantes mostró una comprensión razonable del concepto de entropía. Este entendimiento débil se reflejaba también en el estudio realizado por Pintó Casulleras (1991), que mostró que pocos estudiantes utilizaban entropía para explicar procesos cotidianos y no conectaban entre sí diferentes aspectos de la segunda ley. Sozbilir también encontró que los estudiantes tenían dificultades para comprender el término "desorden" y "espontaneidad". Al parecer, los estudiantes entendían "desorden" como caos, azar o inestabilidad en algunos casos. En otros casos desorden y entropía fueron considerados como sinónimos. También pensaban la "espontaneidad" como un movimiento rápido al azar o como una acción no dirigida. El autor considera que esas ideas provienen muy probablemente de las analogías utilizadas durante la enseñanza, a menudo presentes en los libros de texto.

Christensen (2007) llevó a cabo un trabajo de investigación con estudiantes universitarios de primer año, en un curso introductorio de física para alumnos de ingeniería, física e informática, utilizando entrevistas como metodología. Previamente al comienzo de un curso de termodinámica, se pidió a los estudiantes que respondieran un cuestionario sobre fenómenos térmicos. Se halló que el 64% de los estudiantes tenían ideas someras vinculadas a entropía. Seguidamente se invitó a que respondieran algunas preguntas sobre procesos espontáneos.

Como resultado del trabajo, el 42% de los estudiantes respondieron correctamente que los cambios de entropía del sistema y del entorno cambian; el 19% dijo que la entropía del sistema no cambia y casi nadie (4%) dio una respuesta correcta para las tres partes de la pregunta.

Meltzer (2011) al explorar la comprensión de los estudiantes sobre la segunda ley de la termodinámica y el principio de incremento de entropía en procesos espontáneos, encontró que los estudiantes de cursos introductorios tienen tendencia a argumentar que la "entropía del sistema" siempre debe crecer, incluso en casos en que falta información disponible para efectuar esa determinación. Al mismo tiempo, los estudiantes no aceptan rápidamente la idea de que la entropía total del sistema y su entorno debe aumentar durante los procesos "espontáneos" que ocurren naturalmente. A diferencia de los estudiantes de los cursos introductorios, los alumnos de un curso de física térmica aceptaron fácilmente el principio de que la entropía del universo aumenta en los procesos naturales. Sin embargo, comparten la tendencia a asumir que "la entropía del sistema" siempre debe aumentar independientemente del proceso y de cómo se defina el "sistema".

Bucy, Thompson y Mountcastle (2005, 2006) llevaron a cabo una investigación sobre la comprensión de la Segunda Ley de la Termodinámica y entropía, con estudiantes universitarios. A tal efecto exploraron qué conocimientos se ponían en juego al comparar un proceso de expansión libre de un gas ideal con una expansión isotérmica reversible y al explicar lo sucedido en ambos procesos en términos microscópicos y macroscópicos. Encontraron respuestas que vincularon el concepto de entropía con temperatura y energía y que planteaban que en el proceso isotérmico el cambio de entropía es menor porque la naturaleza cuasiestática de la expansión isotérmica requiere un menor consumo de energía. Algunos estudiantes manifestaron que los cambios de entropía en las dos situaciones es el mismo, porque en los dos casos se incrementa el desorden, sin dar ninguna explicación de porqué se incrementaría el desorden en cada proceso o cuál era el significado del vocablo desorden. Otros afirmaron que el cambio de entropía en la expansión libre es cero porque $dQ = 0$. En la interpretación estadística utilizaron palabras como multiplicidad y microestados e indicaron que la multiplicidad es una función de la temperatura y el volumen y que cuantas más ubicaciones posibles haya para las moléculas, implica una multiplicidad más grande y por lo tanto una mayor entropía, ignorando el aspecto correspondiente a la temperatura. Según los investigadores este hallazgo sugiere que aunque los estudiantes pueden ser más susceptibles a la utilización de la definición estadística, en lugar de la definición termodinámica de la entropía para responder a preguntas conceptuales, su comprensión de la definición estadística aún puede ser incompleta. Para los investigadores, los resultados obtenidos, apoyan la idea de que los estudiantes pueden percibir el aspecto volumétrico de la multiplicidad como un refinamiento de la noción de entropía como desorden. Algunos estudiantes al explicar la expansión libre dijeron que la expansión es tan rápida que el gas se enfría, por lo que la temperatura disminuye. Algunas respuestas señalaron que el cambio de entropía para el proceso isotérmico es cero porque es un proceso irreversible y para la expansión libre, que es positivo debido a la irreversibilidad del proceso. Mientras algunos estudiantes vinculan entropía con conceptos familiares como temperatura y energía, otros la vinculan con desorden y confunden entropía del universo con entropía del sistema. Para los autores, la invocación de la independencia del camino de las funciones de estado proporciona un único medio de llegar a la comparación correcta de los cambios de entropía para los dos ejemplos, tanto en el contexto clásico como en el contexto estadístico.

Sozibilir y Bennett (2007) también evidenciaron una experiencia empírica similar, mostrando que, con el uso de la metáfora desorden vinculada a la entropía, los estudiantes pueden llegar a conclusiones erróneas cuando resuelven problemas. Los estudiantes tratan de explicar entropía como desorden; definen la entropía desde el punto de vista del desorden indicando caos, azar o inestabilidad. El término desorden lo utilizan para referirse a movimiento, choques

de partículas y el grado en que mezclan las cosas y parece que además confunden energía cinética de un sistema con entropía. Ninguno de los estudiantes utiliza microestados para explicar el desorden. Explican el concepto de entropía hablando de azar o desorden de todas las cosas pero no explican el significado de esos términos. No mencionan microestados o niveles de energía. No especifican qué se entiende por caos o aleatoriedad.

Ayyildiz y Tarhan (2012) diseñaron entrevistas que fueron realizadas a dos grupos de estudiantes secundarios turcos: un grupo de control compuesto por veintisiete alumnos y otro grupo experimental compuesto por veinticinco alumnos. Los resultados indican que los estudiantes generalmente interpretan la entropía como una medida del desorden, percibiendo entropía y desorden como sinónimos. Las respuestas más frecuentes consideran que la entropía está relacionada con el número de colisiones o interacciones moleculares; que la entropía de todo el sistema disminuye o no cambia cuando se produce un cambio espontáneo en un sistema aislado; o que la entropía es la causa del desorden en el sistema.

Brosseau y Viard (1992) entrevistaron estudiantes universitarios de física y encontraron que sólo uno de cada diez estudiantes comprendía la constancia de la entropía en un proceso adiabático, en la expansión reversible de un gas ideal. Siete estudiantes argumentaron que, como el volumen aumentó, también lo hizo el desorden y por ende la entropía, lo que evidencia que la metáfora del desorden utilizada por los estudiantes incorpora sólo la contribución espacial en la configuración de la entropía, desconociendo la contribución de la energía y las velocidades que se necesita considerar cuando se caracterizan los microestados.

Ribeiro (1992) entrevistó a 14 estudiantes universitarios portugueses de química del último año. Se informa que, aunque la mayoría de los estudiantes recordaba el término microestado, sólo unos pocos fueron capaces de explicar la entropía en términos de las disposiciones posibles de las partículas. También encontró que, para algunos estudiantes, microestado se percibe como un pequeño estado y no está relacionada con la entropía.

Gould y Tobochnik (2004), evalúan la importancia de la física estadística y térmica en la investigación contemporánea y sostienen que la Mecánica estadística es vista con frecuencia como una colección de artilugios o trucos. Los estudiantes universitarios tienen muchas ideas erróneas sobre la probabilidad. El teorema del límite central es la clave de la mecánica estadística, pero casi no se habla de ello, cuando se investiga las ideas de los estudiantes universitarios para abordar el enfoque microscópico de la entropía. También sostienen que los estudiantes tienen poco sentido de la naturaleza de las fluctuaciones.

Mountcastle, Bucy y Thompson (2007) investigaron algunas dificultades en la comprensión de conceptos estadísticos en un grupo de estudiantes universitarios de física de modo de poder abordar con éxito conceptos de termodinámica con una visión microscópica. Presentaron a los estudiantes problemas basados en modelos discretos, como tirada de dardos contra un blanco y tirada de monedas al azar. Se les solicitaba realizar un análisis de la gráfica en función del número de eventos, compararla con una distribución gaussiana y estimar un cierto grado de incertidumbre. También se les presentó un modelo continuo basado en la medición de precipitaciones y por último se buscó establecer un vínculo entre modelos continuos y discretos. A pesar de que la mayoría de los estudiantes tienen al menos cualitativamente modelos apropiados para las incertidumbres en un contexto continuo (precipitaciones), no logran hacer una traslación al modelo discreto. Los resultados indicaron también que muchos estudiantes conocen la expresión $\sigma_m = \sigma / \sqrt{n}$, pero, carecen de la comprensión conceptual para distinguir entre σ y σ_m por lo que asocian incertezas a todas y cada una de las mediciones de las variables continuas, mientras que a cada tirada binaria no lo hacen.

Weber (2009) llevó adelante un estudio con alumnos ingresantes a un profesorado de ciencias. El propósito de la investigación estuvo centrado en identificar dificultades de comprensión sobre análisis combinatorio y probabilidades que afectaban de modo particular la capacidad

para abordar una interpretación estadística de entropía. Uno de los hallazgos generales del estudio fue que los estudiantes no realizan las conexiones adecuadas entre los conceptos de probabilidad, aleatoriedad y entropía, lo que produce dificultades al pasar de una visión del mundo macroscópico a una del mundo microscópico. El autor señala que el reconocimiento de un espacio muestral extremadamente grande para un sistema molecular es una de las ideas fundamentales necesarias para la comprensión conceptual de entropía y equilibrio. Al explorar alguna vinculación entre el proceso de difusión de un gas con las ideas de probabilidad, concluye que los estudiantes tienen un conocimiento instrumental de difusión y no logran hacer ninguna conexión entre azar, probabilidad, espacio muestral y entropía, por lo que la noción de entropía que detentan es incompleta o instrumental, sin conexión entre las propiedades moleculares y la medida de la entropía. En una entrevista posterior detectó cinco definiciones de entropía dadas por los estudiantes que, según el investigador se debería a los distintos métodos utilizados en la enseñanza secundaria cuando se explica el concepto. Ninguna de ellas incluye la idea de microestados: Entropía como desorden resultante del movimiento aleatorio de las moléculas (se mencionan sólo las direcciones al azar del movimiento molecular y no la variación de velocidades moleculares); Entropía como una medida del desorden de las cosas que mide el estado actual de un sistema; Entropía como tendencia a ser desordenada o en otras palabras, las moléculas tienden a dejar el orden para ir al desorden o el caos; Entropía vinculada a ΔS (entropía como fórmula), sin proporcionar información adicional, es decir conocimiento procedimental sin connotación conceptual y Entropía asociada a energía (entropía como una forma de energía).

Loverude (2009, 2010) ha realizado varios estudios con estudiantes universitarios sobre la comprensión de temas estadísticos dentro de un curso de un semestre de física térmica, que combina termodinámica clásica y mecánica estadística. En el primero de estos estudios, investigó la comprensión de las distribuciones de probabilidad dentro de un sistema binario (tirada de monedas, género de niños, modelo de Ising, etc.), así como las habilidades para distinguir un microestado de un macroestado en un contexto determinado. Encontró que un 45% de los estudiantes fue incapaz de determinar correctamente la probabilidad de obtener todas caras en una serie de eventos de tirada de monedas. También encontró que un 37% de los estudiantes confundían microestado y macroestado en sus respuestas indicando, por ejemplo, que todos los macroestados son igualmente probables. En un estudio posterior analizó la capacidad de los estudiantes de razonar sobre dos sistemas termodinámicos cuando interactúan entre sí. Utilizó un contexto de bolas colocadas en cajas, así como la interacción de sólidos de Einstein, un sistema físico más complejo que el sistema binario antes mencionado. Encontró que muchos estudiantes tienen dificultad para determinar la multiplicidad combinada de los dos sólidos juntos a partir de cada una de sus multiplicidades individuales. Un 60% de los estudiantes sumó las multiplicidades de las partes constituyentes, en lugar de multiplicarlas. También encontró que los estudiantes a menudo consideraban que el macroestado más probable es aquel en el que cada sólido tiene la misma cantidad de energía, lo cual sólo es cierto si los sólidos son de igual tamaño. Loverude informó en sus artículos sobre los resultados de la aplicación de dos tutoriales: *Contando Estados* y *Estados en el Sólido de Einstein*, creados para abordar las dificultades discutidas. *Contando Estados* usa el contexto de tirada de monedas para derivar la distribución binomial, focalizando en la distinción entre microestado y macroestado y cómo se los define en un determinado contexto físico. *Estados en el Sólido de Einstein* aborda la distinción de lo que constituye un macroestado y un microestado en ese caso y el cálculo del número de microestados correspondiente a cada macroestado. Se utiliza una representación simbólica de los osciladores y las unidades de energía para establecer una analogía entre la relación oscilador-energía en el sólido de Einstein y la relación cara-cruz en la tirada de monedas. Casi la totalidad de los estudiantes que participaron en el tutorial respondió correctamente a una pregunta cualitativa de examen que requería una distinción entre microestado y macroestado. Sólo el 50% de los estudiantes, sin

embargo, aplicó correctamente estas definiciones en un caso cuantitativo en el que se les pidió que determinaran la probabilidad de una secuencia de tirada de monedas (un microestado).

Granville (1985), en sus investigaciones acerca de las concepciones previas sobre entropía de alumnos de química, detectó que los estudiantes muchas veces se confunden cuando aplican el principio $\Delta S \geq 0$ para los procesos espontáneos, debido a que no siempre está explicitado claramente a qué parte del sistema nos referimos y usualmente confunden el sistema con el medio ambiente. Esta confusión proviene de no explicitar claramente la diferencia entre sistema, universo y medio ambiente, dando por resultado que los estudiantes responden cosas como: Un sistema tiende siempre al máximo de S; en un sistema aislado $\Delta S_{\text{sist}} \geq 0$; en cualquier tipo de sistema $\Delta S_{\text{sist}} > 0$ siempre; $\Delta S_{\text{univ}} = 0$ en cualquier sistema; $\Delta S_{\text{univ}} = 0$ para un proceso adiabático; en cualquier proceso la entropía del universo no varía o decrece.

Carson y Watson (2002) llevaron a cabo una investigación en Inglaterra con una cohorte de primer año de 100 estudiantes universitarios de pregrado. Los estudiantes fueron entrevistados dos veces: la primera vez antes de que asistan a un ciclo de conferencias sobre termodinámica química y la segunda vez después del curso. El objetivo de este estudio fue explorar la comprensión de los estudiantes sobre entropía y energía libre de Gibbs, con el fin de obtener resultados para una eventual mejora en la estrategia de enseñanza. El análisis de las entrevistas reveló que muchos estudiantes utilizan las palabras entropía, entalpía y energía caótica como términos para etiquetar diferentes formas de energía, de modo de dar sentido a términos termodinámicos. Otros estudiantes explican entropía en términos de desorden o aleatoriedad, pero no expresan el significado de estos términos. Ninguno de ellos hace mención a microestados y niveles de energía. De acuerdo a las respuestas, interpretan que las variaciones de entropía se dan cuando se produce un cambio de estado, lo que hace suponer, según los investigadores, que los alumnos recuerdan que hay un aumento de la entropía en el cambio de sólido a líquido y en el cambio de líquido a gas, y sus explicaciones se fundamentan en un aumento de la aleatoriedad del movimiento de las partículas. Se detectaron serias confusiones entre sistema y medio ambiente, dando lugar a falta de comprensión de los efectos de la transferencia de energía desde y hacia el entorno. El hallazgo principal fue la asociación de entropía como forma de energía y la consideración de la energía como sustancia material, que puede ser transferida entre entidades y puede tomar diferentes formas.

Covolan y Da Silva (2005), llevaron a cabo una investigación para identificar las concepciones previas de estudiantes de escuelas secundarias acerca de la noción de entropía. Los investigadores proponen a los alumnos la resolución de actividades, basadas en ejemplos cotidianos y de los libros de texto. Procesos reversibles e irreversibles fueron parte del cuestionario y del debate y se presentaron las leyes de la termodinámica y el concepto de entropía según la visión de Clausius y de Boltzmann. Surge de la investigación que los alumnos no pueden hacer una distinción clara entre calor y temperatura; que los objetos son contenedores de calor y contenedores de frío; que el desorden es una tendencia natural de los fenómenos espontáneos asociando un aumento del desorden con la entropía y muchos de ellos no distinguen los fenómenos susceptibles de reversión, de los totalmente irreversibles.

Cochran y Heron (2006), exploraron las dificultades conceptuales que tienen estudiantes universitarios de las carreras de física e ingeniería sobre aspectos macroscópicos y microscópicos de la termodinámica. Detectaron que tienen inconvenientes en interpretar entropía como función de estado, por lo que no podían comparar correctamente los cambios de entropía entre dos procesos diferentes que tuviesen el mismo estado inicial y final. También, encontraron que había deficiencias en la aplicación de la segunda ley de la termodinámica para predecir si podían ocurrir ciertos procesos y qué papel juega la entropía en la limitación del rendimiento de un motor térmico.

Christensen, Meltzer y Ogilvie (2009) llevaron a cabo una investigación con un grupo de estudiantes universitarios de las carreras de física, ingeniería e informática, sobre aspectos relacionados con el aumento de entropía. Los autores comprueban que la mayoría intenta conciliar dos ideas: la percepción común de que la “entropía siempre aumenta” y la creencia de que la entropía debe conservarse. Su principal hallazgo fue que la idea de que la entropía de un sistema y su medio ambiente se conserva en los procesos espontáneos es uno de las concepciones alternativas más comunes entre los estudiantes. Los investigadores consideran que estas ideas pueden deberse a que los estudiantes confunden entropía con energía, porque la energía es una magnitud extensiva que se conserva. La creencia de que la entropía se conserva conduce a dificultades en la comprensión del papel de la entropía en la segunda ley de la termodinámica y los procesos termodinámicos.

2.4.2 Síntesis de las concepciones y potenciales dificultades en el contexto local

De todos los artículos consultados, es reconocido por los investigadores que los niños desde edad temprana desarrollan ideas intuitivas relacionadas con la segunda ley de la termodinámica (en el sentido de reconocer procesos espontáneos o la irreversibilidad de los fenómenos), pero que las dificultades de los estudiantes en la comprensión de conceptos como calor y temperatura son inconvenientes básicos para entender la segunda ley.

Algunos autores destacan que las diferentes maneras de expresar la segunda ley tienen como contrapartida la no integración de las mismas e incluso persiste en la mente de los estudiantes una no muy clara conexión entre ellas cuando tratan de describir un mismo fenómeno.

Se pueden reconocer en las investigaciones analizadas diversas interpretaciones alternativas de la noción de entropía, en muchos casos muy alejadas del concepto científico. La Tabla 2.2 resume los principales hallazgos.

La metáfora desorden es uno de los argumentos más utilizados para explicar e intentar comprender el concepto de entropía, de modo que entropía y desorden son utilizados en muchos casos como sinónimos. Los términos desorden, caos, aleatoriedad y entropía permanecen indiferenciados, sin haber una descripción clara del significado de esos términos.

En lo que se refiere particularmente a cuestiones vinculadas con la interpretación microscópica, los investigadores detectan dificultades por parte de los estudiantes en la comprensión de distribuciones de probabilidad en sistemas binarios y falencias en la distinción entre multiplicidad, macroestado y microestados, lo que repercute fuertemente para poder interpretar la noción de entropía en términos de probabilidades.

Asociar valores discretos con un modelo continuo e interpretar equilibrio de un sistema con un modelo microscópico y un modelo macroscópico contempla varios niveles de dificultad que habrá que superar. Las investigaciones centradas en el abordaje del análisis microscópico de procesos adiabáticos e isotérmicos han detectado que las explicaciones dadas por los estudiantes incorporan sólo la contribución espacial dejando de lado la contribución debido a la temperatura, por lo que no es posible caracterizar los microestados del sistema y articularlos con el espacio muestral correspondiente.

En resumen, uno de los hallazgos generales obtenidos en nuestro relevamiento es que los estudiantes no realizan las conexiones adecuadas entre los conceptos de probabilidad, aleatoriedad y entropía. Si se pretende abordar una descripción estadística del concepto, los estudiantes necesitan estar mejor preparados en conceptos estadísticos, especialmente referidos a la probabilidad de un evento, comparaciones de probabilidad y cálculo del tamaño de espacios de muestra (es decir, combinaciones).

Eso sugiere que se deben desarrollar estrategias para presentar el concepto de entropía de manera integral. Es necesario poner de relieve la naturaleza de partículas de la materia, llamar la atención sobre el gran número de microestados de un sistema, comparar la probabilidad de

los varios macroestados. Más importante aún, es necesario ayudar a los estudiantes universitarios a comprender cómo se relacionan estos conceptos con la entropía de un sistema y las nociones de equilibrio e irreversibilidad.

Desorden	Desorden visible y entropía considerados como sinónimos. La entropía representa el desorden del sistema o es la causa del desorden del sistema o es la medida del desorden. Los estudiantes hablan de entropía como aleatoriedad o desorden sin poder explicar el significado de estos términos	Sözbilir (2001), Sözbilir y Bennett (2007), Weber (2009), Selepe y Bardley (1997), Carson y Watson (2002), Bucy, Thompson y Mountcastle (2005,2006), Ayyildiz y Tarhan (2012)
Forma de energía	Entropía considerada como otra forma de energía o como algo que tiene que ver con la energía. Indiferenciación de nociones de entropía, energía cinética, entalpía, etc., todas consideradas como formas de energía.	Carson y Watson (2002) Weber (2009)
Tendencia hacia el caos	Entropía como indicador de la tendencia de la materia a ser cada vez más desordenada, pasando del orden al caos	Weber (2009)
Entropía como fórmula	Recuerdo de alguna expresión matemática específica, sin poder atribuirle significado. Entropía como “algo” que tiene que ver con dS , sin proporcionar cualquier información adicional. Se reconoce la entropía como un procedimiento o fórmula	Weber (2009)
Movimiento aleatorio	Inadecuada conexión de entropía con el número de colisiones e interacciones intermoleculares. Resultante del movimiento aleatorio de moléculas, considerando sólo direcciones aleatorias y no velocidades moleculares.	Sözbilir (2001), Sözbilir y Bennett (2007), Weber (2009)
Energía cinética	Relación fuerte entre entropía y energía cinética de las partículas. Explicaciones referidas a aumento de entropía en términos de aumento de la energía cinética de las partículas.	Johnstone y otros (1977), Selepe y Bradley (1997), Sözbilir (2001)
Magnitud conservativa	La entropía de un sistema y su entorno se mantiene constante. La entropía del universo no cambia. La entropía no cambia cuando se produce un cambio espontáneo en un sistema aislado.	Ribeiro (1992), Christensen (2007)
Tendencia a ignorar el entorno	Inadecuada conexión entre entropía de un sistema y cambios de entropía en su entorno. Argumentaciones basadas sólo en el sistema, sin considerar el entorno.	Sözbilir (2001), Weber (2009), Sözbilir y Bennett (2007), Carson y Watson (2002)
Sobre-generalización de la segunda ley	La entropía de un sistema <i>siempre</i> aumenta. El cambio de entropía es siempre positivo. Por la 2da ley, la entropía del sistema debe aumentar en un cambio espontáneo. En un sistema aislado el cambio de entropía es mayor o igual a cero.	Ribeiro (1992), Sözbilir (2001). Thomas y Schwenz (1998), Christensen (2007) Meltzer (2007)
Cambios de entropía sólo en cambios de estado	Sólo se reconocen cambios de entropía en situaciones de cambio de estado.	Carson y Watson (2002)
Cambio de entropía asociado a cambio de temperatura	Cuando se incrementa la entropía, la temperatura también aumenta	Johnstone et al. (1977)
Relaciones con otras magnitudes	Relaciones incorrectas entre cambios de entropía y otras cantidades termodinámicas tales como temperatura, trabajo, o transferencia de calor	Bucy, Thompson y Mountcastle (2006)
Relación macro-micro	La multiplicidad es función de la temperatura y el volumen.	Bucy; Thompson y Mountcastle (2006)

Tabla 2.2: Concepciones de los estudiantes sobre entropía.

Índice

- 3.1 Simulaciones en la enseñanza de la Física.**
 - 3.2 Simulaciones. Entropía desde una perspectiva microscópica.**
 - 3.2.1 Molecular Workbench.**
 - 3.2.2 Physics Education Technology Project.**
 - 3.2.3 Processi Termici ed Entropía.**
 - 3.2.4 Statistical Interpretation of Entropy.**
 - 3.2.5 Statistical and Thermal Physics.**
 - 3.2.6 Experimentos Interactivos en Sistemas Físicos Complejos.**
 - 3.3 Implicaciones del análisis para abordar nuestra experiencia.**
-

Con el transcurso de los años la tecnología ha ido modificando nuestro quehacer diario. Actualmente en el sistema educativo y particularmente en las aulas de física se producen cambios estructurales ligados a la irrupción de dispositivos tecnológicos variados.

El uso de las simulaciones por computadora se ha constituido en un recurso didáctico interesante para propender a mejorar los aprendizajes. La utilización de simulaciones en el aula implica trabajar con modelos e investigar una manera diferente de interactuar con los alumnos.

Desde hace algunos años numerosos grupos de investigación en enseñanza de la física están abocados a investigar acerca de la potencialidad didáctica de ese recurso y su contribución eficaz al tratamiento de cientos de temas de ciencias.

En este capítulo por un lado escrutamos el papel de las simulaciones en base a la idea de pensarlas como herramientas útiles que mejoran la comprensión de los alumnos en los aspectos epistemológicos y cognitivos. Por otro lado se hace una descripción de algunos sitios de interés y, a partir de ello se seleccionan algunas simulaciones interesantes y útiles para nuestro trabajo.

3.1 SIMULACIONES EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Son cada vez más numerosos los trabajos que se refieren a la utilización de simulaciones en la enseñanza de las ciencias, aunque cabe destacar que coexisten en ellos dos corrientes diferenciadas. Una responde a la postura de los “desarrolladores”, que ponen énfasis en el diseño de herramientas, sea de tipo “applets” o software de simulaciones más complejos, presentando en general una visión optimista y muchas veces acrítica de su uso por parte de docentes y estudiantes. La otra, más enmarcada en una perspectiva de investigación didáctica, propone alternativas didácticas y reflexiones epistemológicas tendientes a integrar las TICs en la enseñanza de manera crítica y reflexiva.

En general, la mayoría de las publicaciones sobre investigaciones realizadas para estudiar las ventajas y desventajas del uso de las simulaciones en enseñanza de las ciencias destacan que

favorecen la adquisición de ciertas aptitudes y capacidades, dentro de un clima de aceptación muy favorable. Laurillard (1981) señala que las simulaciones proporcionan un ambiente de aprendizaje que permite la exploración por parte de los estudiantes. Thomas y Neilson (1995) dicen que las simulaciones posibilitan un acceso directo al “fenómeno” para que los estudiantes puedan comprobar preguntas sobre su comportamiento. Santinelli y Siñeriz (2001), Casadei Carniel y otros (2008), destacan que la utilización de las mismas propende a elevar el rendimiento académico de los estudiantes.

Por otra parte, y teniendo en cuenta la frecuente afirmación que asigna a estos recursos por sí mismos una función motivadora, Marchisio (2003) ha observado que ésta se pone en juego mientras el recurso en cuestión se constituya como novedad; y que la mayor motivación, según afirmaciones de los alumnos, reside en la toma de conciencia de su utilidad para la comprensión de contenidos clasificados como difíciles por ellos.

La simulación puede desempeñar un importante papel en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la Física (Sierra y Perales, 2007). Por un lado, constituye un *espacio intermediario*, que puede facilitar la puesta en relación de la realidad con las teorías o modelos (Barberá y Sanjosé, 1990), o entre lo concreto y lo abstracto (Valente y Neto, 1992). Por otra parte, representa un instrumento que permite actividades de manipulación de modelos que facilitarán la adquisición de conocimientos conceptuales y procedimentales (Andaloro *et al.*, 1991).

Sierra (2000) destaca además que la simulación por computadora se adapta adecuadamente para ser utilizada en una estrategia de aprendizaje exploratorio, en la que un modelo oculto debe ser descubierto por el alumno. Para este autor, la tarea de ejecutar trabajos ayudándonos con programas didácticos de simulación, presenta las siguientes ventajas:

- Se reproducen fenómenos naturales difícilmente observables de manera directa en la realidad, por motivos de peligrosidad (proceso de fisión en un reactor nuclear), de escala de tiempo (proceso de desintegración de un radioisótopo, evolución de una población de seres vivos dentro de un ecosistema), de escala espacial (movimientos planetarios, movimiento de las partículas de un gas) o de carestía del montaje (espectrómetro de masas).
- El alumno pone a prueba sus ideas previas acerca del fenómeno que se simula mediante la emisión de hipótesis propias, lo cual redundará en una mayor autonomía del proceso de aprendizaje.
- El alumno comprende mejor el modelo utilizado para explicar el fenómeno, al observar y comprobar, de forma interactiva, la manera en que se representa lo real.
- La simulación posibilita extraer una parte de la física o la química que subyace en una determinada experiencia, simplificando su estudio, lo cual facilita la comprensión del fenómeno.
- El alumno puede modificar, a voluntad, los distintos parámetros y condiciones iniciales que aparecen en el modelo físico-químico del simulador, lo que ayuda a formular sus propias conclusiones a partir de distintas situaciones.
- La simulación evita al alumno los cálculos numéricos complejos, lo que le permite concentrarse sólo en los aspectos más conceptuales del problema.
- La simulación ofrece al alumno una amplia variedad de datos relevantes, que facilitan la comprobación cualitativa y cuantitativa de leyes científicas.
- Los problemas físicos o químicos con un trasfondo matemático complejo pueden ser tratados, haciéndolos asequibles al estudiante (sistemas no lineales, caos)

La mayoría de los muchísimos trabajos de investigación que hacen referencia al uso de simulaciones en la enseñanza de las ciencias, resaltan que esa herramienta contribuye a un mejor aprendizaje de los conocimientos impartidos.

Muchos investigadores (Jaén, Novell, Enrech y Bohigas, 2006; Concari y Kofman, 2005; Catalán, Serrano y Concari, 2010; Kofman, 2004; Greca, Seoane y Arriasecq, 2013; Utges, Fernández y Jardon, 2011) destacan que la simulación puede ser una herramienta útil para mejorar la comprensión por parte de los estudiantes de diferentes temas y, particularmente, para interpretar el papel de los modelos en la explicación de los fenómenos. En ese sentido, las propuestas que contemplan el uso de las simulaciones deben tener en cuenta los aspectos epistemológicos y didácticos que se ponen en juego, y en qué medida esos aspectos favorecen la comprensión conceptual de los fenómenos físicos.

Para abordar el desarrollo de una actividad de enseñanza y aprendizaje con nuevas tecnologías, Kofman (2004), destaca que se requiere integrar tres campos del saber: el específicamente disciplinar, el tecnológico, y el pedagógico. A su vez, quienes utilizan estas herramientas y metodologías en el aula requieren de una capacitación importante en estos aspectos. Es importante saber, por ejemplo, que un software de simulación está basado en un modelo idealizado que nunca puede representar todos los aspectos de la “realidad”, que muchas veces se utilizan herramientas de cálculo numérico cuyos resultados son aproximados y no satisfacen exactamente las ecuaciones de origen, conocer las funciones y forma de operar de las herramientas específicas que se utilicen, etc. También es sustancial que los docentes dominen los fundamentos pedagógicos específicos de este campo, para poder adaptar la propuesta didáctica a su entorno particular de enseñanza, y realizar nuevos diseños poniendo en juego su propia creatividad.

Giacosa, Giorgi y Concari (2009), sostienen que los applets son herramientas válidas para enfatizar la conceptualización de los modelos físicos en la construcción del conocimiento científico, acordando con Brewe (2008) en que la modelización se usa escasamente en el nivel universitario y que quizás ese uso escaso responda a que los docentes carecen de seguridad y certeza apropiada para enfrentar los aprendizajes mediante el uso de esa herramienta.

Sin embargo, entre las múltiples facetas que se pueden plantear en cuanto al uso de las mismas, mencionan algunas ventajas como recursos didácticos que no tienen otras herramientas. Entre esas ventajas, resaltan que:

- favorecen la construcción de modelos mentales
- amplían las posibilidades de trabajo interactivo de los alumnos con representaciones de la realidad
- facilitan la integración de modelos teóricos con la experimentación en entornos virtuales y con la resolución de problemas de lápiz y papel
- pueden colaborar con la adquisición de: contenidos conceptuales relacionados con fenómenos físicos inaccesibles
- contribuyen a la adquisición de contenidos procedimentales -tales como elaboración de conjeturas, manejo de variables, registro e interpretación de información,
- permiten reconocer el rol de los modelos en la construcción de conocimiento científico, y su carácter provisional y perfectible

Más allá de las ventajas o potencialidades hasta aquí mencionadas, es necesario considerar que, ante esta diversidad de actividades posibles, los programas de simulación utilizados en el aula deben ser seleccionados en coherencia con los objetivos pedagógicos perseguidos. En ese sentido, coincidimos con Utges, Fernández y Jardon (2003), cuando plantean que, para introducir una simulación en un contexto de aprendizaje, es necesario pensar qué propósito se atribuirá al recurso en el proceso de enseñanza – aprendizaje, y cómo se inserta el mismo en una secuencia didáctica adecuada, destinada a promover aprendizajes específicos. Estos autores proponen también la necesidad de profundizar el análisis de las potencialidades y riesgos en el uso de las simulaciones desde un enfoque que asume que la simulación tiene un status propio, diferente de la experimentación o de los tradicionales problemas de lápiz y papel. Sugieren que las simulaciones pueden ser útiles para el aprendizaje en la medida que las

actividades que se promuevan con ellas respeten el papel epistémico que juegan en el campo de la ciencia y la tecnología: la construcción, el análisis y la validación de modelos. Para avanzar en la perspectiva señalada, es preciso, profundizar el análisis de la relación entre simulaciones y modelos.

En este sentido, nos consustanciamos con la perspectiva teórica desarrollada por Beaufils (2000, 2001, 2009), que ubica a la simulación como intermediaria entre el “mundo” de las teorías y modelos y el mundo de los fenómenos, objetos y acontecimientos (figura 3.1). El autor, basándose en los trabajos de Buty (2001) y Vince (2000), plantea que la puesta en relación entre esos dos mundos es clave en la enseñanza de la física.

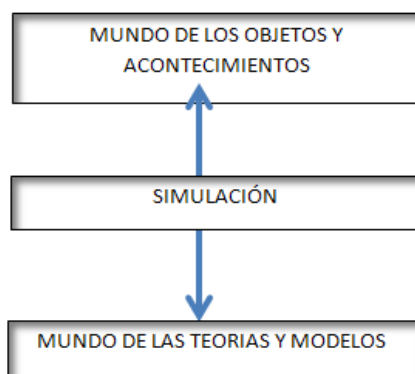


Figura 3.1 Simulación como intermediaria entre el mundo de la teoría y el de los objetos

Beaufils esquematiza el papel de la simulación mediante una estructura conformada por tres capas o planos como se muestra en la figura 3.2. La capa superior representa el espacio de las teorías y modelos. La inferior está conformada por el espacio real que representa objetos, fenómenos e instrumentos y la central representa la simulación.

El plano de la simulación es reconocido como un plano complejo. Señala que ese nivel corresponde a una realidad que tiene su propia naturaleza y propiedades; en ese plano se genera una transformación tanto del plano de la teoría y modelos como del plano de los objetos y fenómenos, utilizando un programa informático.

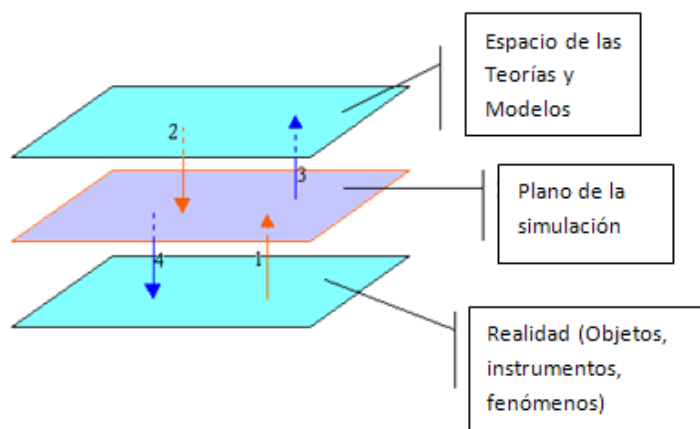


Figura 3.2: Modelos, simulación y realidad. Fuente: Beaufils, 2001

Las flechas rojas conectan el espacio de las teorías y modelos con el plano de la simulación y el espacio inferior de los fenómenos con la simulación. Las actividades a realizar están representadas por las flechas azules. Por un lado los estudiantes, a través de la simulación, pueden reforzar sus conocimientos relativos a las teorías y/o modelos y por otro lado, reconocer objetos y/o fenómenos.

El autor esquematiza el plano de las simulaciones, representándolo a su vez con tres capas como puede verse en la figura 3.3. La capa central, denominada plano de las representaciones simbólicas, comprende el programa informático que permite modelar los sistemas y las animaciones digitalizadas que se trabajan en la simulación. La capa superior es representativa del modelo teórico con el cual se programa y la capa inferior corresponde a las representaciones figurativas o gráficas que permitirán la visualización del modelo en pantalla.

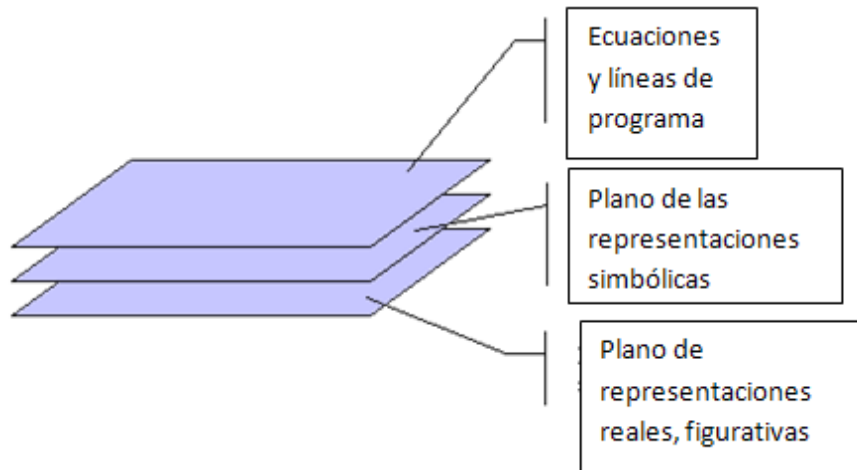


Figura 3.3: Representación de los diferentes planos de la simulación Fuente: Beaufils, 2001

En la Figura 3.4 se sintetizan las figuras 3.2 y 3.3 en un solo esquema. Para diseñar una simulación, primero se plantea el fenómeno que será modelado por la teoría y este modelo se vuelve luego a modelar informáticamente, de modo de construir la versión simulada del fenómeno que se quiere estudiar.

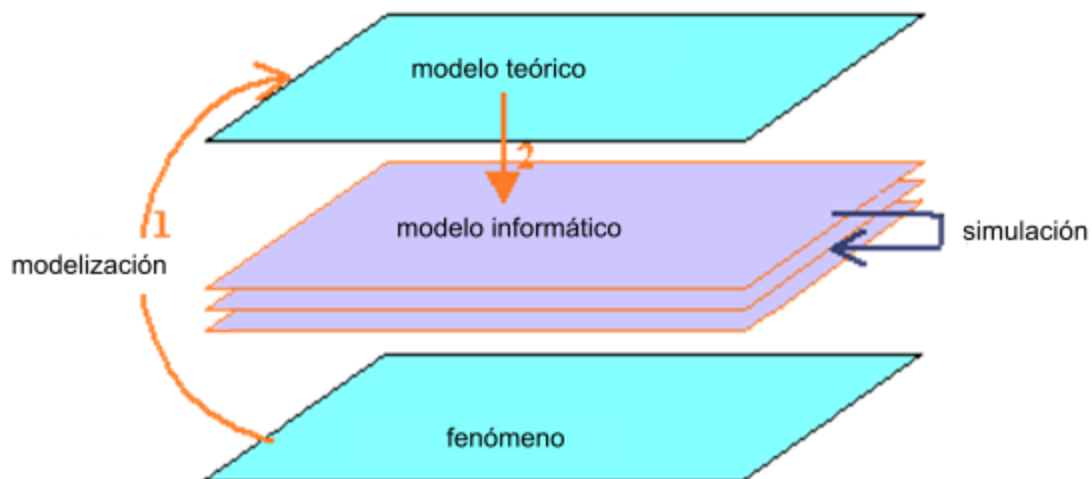


Figura 3.4: Esquema de modelización. Fuente: Beaufils, 2001

El autor hace una distinción entre simulaciones basadas en un modelo teórico y simulaciones basadas en una semejanza de las representaciones fenomenológicas. En el primer caso interpreta que existe un vínculo evidente entre el plano de los modelos y la programación de los cálculos. En el segundo caso debe haber necesariamente un programa, pero que puede ser sin vínculo con la teoría.

Ya sea en uno u otro caso, la modelización por computadora implica elaborar un modelo informático a partir del mundo de los fenómenos o elaborarlo a partir de un modelo teórico, o dado por las ecuaciones que describen el fenómeno como se muestra en la figura 3.5. Las flechas 1 y 1 bis son indicadoras de esos dos posibles recorridos.

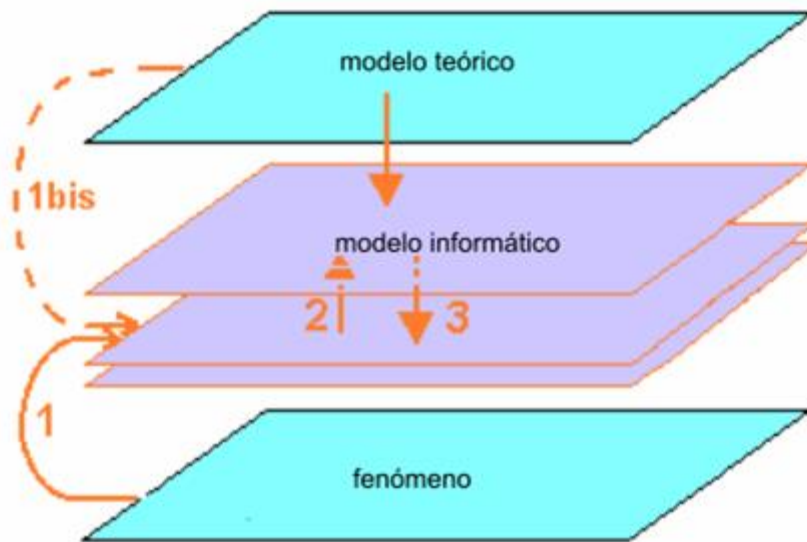


Figura 3.5: Caminos de modelización. Fuente: Beaufils, 2001

En base a estas consideraciones, Beaufils destaca la importancia de resaltar el papel epistémico de las simulaciones en la enseñanza de la física: poner en juego las relaciones entre teorías, modelos y fenómenos. Para ello, el profesor debe prever cuestiones y actividades, que permitan establecer vínculos, clarificar el modelo y explicar el método de cálculo involucrado.

Esto implica que la incorporación de simulaciones en el aula de física plantea cuestiones epistemológicas y didácticas que es necesario tener en cuenta para lograr un uso efectivo. Es necesario superar su utilización acrítica, que las interpreta como meras animaciones o que potencia su carácter interactivo, pero no tiene en cuenta adecuadamente que no se están manipulando variables de lo real, sino variables de un modelo teórico que representa lo real. Eso implica recuperar adecuadamente el papel epistémico de la simulación, muy diferente del de la experimentación. En todo caso, podemos decir que la simulación es la “experimentación” de un modelo teórico.

3.2 SIMULACIONES. ENTROPÍA DESDE UNA PERSPECTIVA MICROSCÓPICA

Existen en la web numerosos sitios que presentan simulaciones y applets relacionados con diversos temas de física, aunque no son tantos los que se refieren al tema que nos interesa.

Como parte del análisis preliminar, realizamos una búsqueda intensiva, que nos permitió localizar seis sitios con propuestas que podrían ajustarse a nuestros propósitos, que describimos a continuación:

- Molecular Workbench, MW, (mw.concord.org) , desarrollado por Concord Consortium, bajo la conducción del físico computacional Charles Xie (USA).
- Physics Education Technology Project, PHET, (phet.colorado.edu) desarrollado por el grupo Physics Education Research de la Universidad de Colorado, Boulder (USA), bajo la dirección de Katherine Perkins y Wendy Adams

- Processi Termici ed Entropía, PROTERM, (www.griaf.unipa.it), desarrollado por el grupo GRIAF (Grupo de Ricerca sull' Insegnamento/Aprendimento della Física), de la Universidad de Palermo (Italia) conducido por la profesora Rosa María Sperandeo Mineo.
- Statistical Interpretation of Entropy Package, SIE, alojado en Open Source Physics (USA) (www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10161), desarrollado por Todd Timberlake, director del Observatorio Astronómico del Berry Collage.
- Statistical and Thermal Physics Package, STP, también alojado en Open Source Physics (USA). (www.opensourcephysics.org/items/detail.cfm?ID=7308), desarrollado por los profesores Harvey Gould, de la Universidad de Clark y Jan Tobochnik del Kalamazoo College.
- Experimentos Interactivos en Sistemas Físicos Complejos, desarrollado por Ricardo Brito, miembro del grupo Interdisciplinario de Sistemas Complejos (GISC), de la Universidad Complutense de Madrid. (seneca.fis.ucm.es/expint/html/frame.html),

3.2.1 Molecular Workbench (MW)

Molecular Workbench (MW), es un entorno virtual desarrollado por el denominado consorcio Concord (The Concord Consortium) para los estudiantes de escuela secundaria. Su creación estuvo a cargo del físico computacional Charles Xie. Constituye una potente herramienta para el diseño y realización de experimentos computacionales con átomos y moléculas.

El modelo básico de las simulaciones es la dinámica molecular. Cada átomo/molécula interactúa con los/las demás siguiendo las leyes de la mecánica clásica, con un potencial de Lennard-Jones con parámetros que pueden ser modificados para simular diferentes tipos de átomos/moléculas.

El software comprende cientos de simulaciones desarrolladas con código libre y abierto que cubren una amplia gama de temas de ciencia incluyendo las leyes de los gases, los estados de la materia, enlace químico, reacciones químicas, electrostática, transferencia de calor, mecánica de fluidos, fracturas, mecánica cuántica, difusión, ósmosis, entre otras. Las simulaciones son acompañadas por tutoriales y evaluaciones integradas, que se orientan a la comprensión conceptual.

Una herramienta de código abierto como MW permite a los docentes y estudiantes construir sus propios objetos para generar y evaluar modelos e ideas. El sitio permite además que los profesores construyan sus propios tutoriales, incorporando en ellos las simulaciones que deseen.

El sitio no aborda particularmente el tema entropía, pero muchas de sus simulaciones permiten comprender nociones termodinámicas desde una perspectiva microscópica. En el ejemplo de la figura 3.6, puede verse el modelo que representan átomos de cuatro sustancias que se encuentran a la misma temperatura. La masa de las sustancias es diferente. En la esquina inferior izquierda hay una serie de preguntas destinadas a promover una investigación sobre la incidencia de la masa y la velocidad de las partículas sobre la temperatura.

Otra simulación interesante es la que aborda la distribución de velocidades de las moléculas de un gas ideal o distribución de velocidades de Maxwell. Se hace correr la simulación hasta que se llena todo el recipiente. Cliqueando los dos botones debajo de la pantalla se tiene la representación instantánea de las curvas de distribución de velocidades de Maxwell (Fig. 3.7).

Heat and Temperature: Kinetic Energy, not Speed

< PREV NEXT > PAGE index 1 2 3 4 5 6 7 8 9

The previous page showed that atoms move faster when temperature is higher. **Is temperature related only to the speed of atoms?** On this page you will explore different substances **at the same temperature** and compare them.

Imagine you have a cup of juice, a book, and a fork on a table. They are all the same temperature. Are the atoms all moving the same speed? In the model below you will place different substances, composed of atoms with different masses, in the container. The model will hold the temperature constant for each substance. What differs?

Select a substance below:

- ☒ Substance 1 (atom mass = m_1)
- ☐ Substance 2 (atom mass = m_2)
- ☐ Substance 3 (atom mass = m_3)
- ☐ Substance 4 (atom mass = m_4)

where $m_1 < m_2 < m_3 < m_4$. Note that because the temperatures of all four are set to be the same, the red bar on the right stays at the same height.

Run Stop Reset

The temperature of a substance is related to:

- ☐ A. Only the speed of the atoms.
- ☐ B. The mass of the atoms.
- ☐ C. Both the speed and the mass of the atoms.
- ☐ D. Neither the speed nor the mass.

Revisar respuesta

A substance composed of atoms A and another composed of atoms B are at the same temperature, but atom A is ten times more massive. How does the speed of A compare to the speed of B, on average?

Figura 3.6: Página de un tutorial de Molecular Workbench

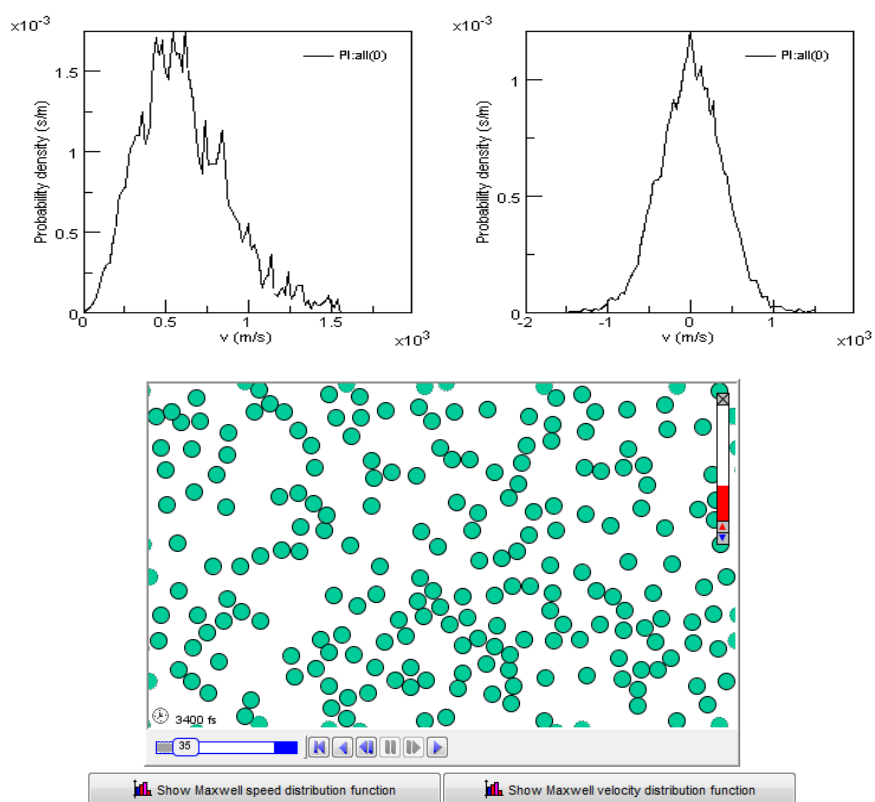


Figura 3.7: Applet Distribución de velocidades de Maxwell (MW)

3.2.2 Physics Education Technology Project (Phet)

Phet es un conjunto de applets diseñados para la enseñanza y el aprendizaje de conceptos básicos de física y química, en el nivel secundario y universitario básico. En cada simulador Phet existen controles que permiten configurar los parámetros básicos del fenómeno que se estudia. Todas las simulaciones están desarrolladas en Java y Flash. Se pueden ejecutar en un navegador web y descargarlas gratuitamente. El sitio no aborda el tema entropía, pero muchas de sus simulaciones abordan nociones termodinámicas desde una perspectiva microscópica. Una característica del proyecto, es que los usuarios pueden traducir las aplicaciones. De hecho, el sitio permite descargar muchos de los applets ya traducidos al español.

A medida que el usuario manipula las herramientas interactivas pueden incorporar instrumentos de medición como reglas, voltímetros, o termómetros. La respuesta observada en pantalla está animada a través de diferentes ventanas donde se visualizan movimiento de objetos, gráficos, lecturas varias, etc.

El Proyecto Phet ha llevado adelante diversas investigaciones, en una gran variedad de ambientes educativos, para evaluar la eficacia de las simulaciones creadas. Las áreas de investigación incluyen: capacidad de los estudiantes para resolver problemas desde lo conceptual y cuantitativamente; actitudes y creencias de los estudiantes sobre el aprendizaje de la física; sobre su propio aprendizaje y sobre las simulaciones en sí mismas; efectividad de las simulaciones como herramienta de aprendizaje; interacción del alumno con la simulación en diferentes entornos (por ejemplo tutorial guiado versus-juego-desafío).

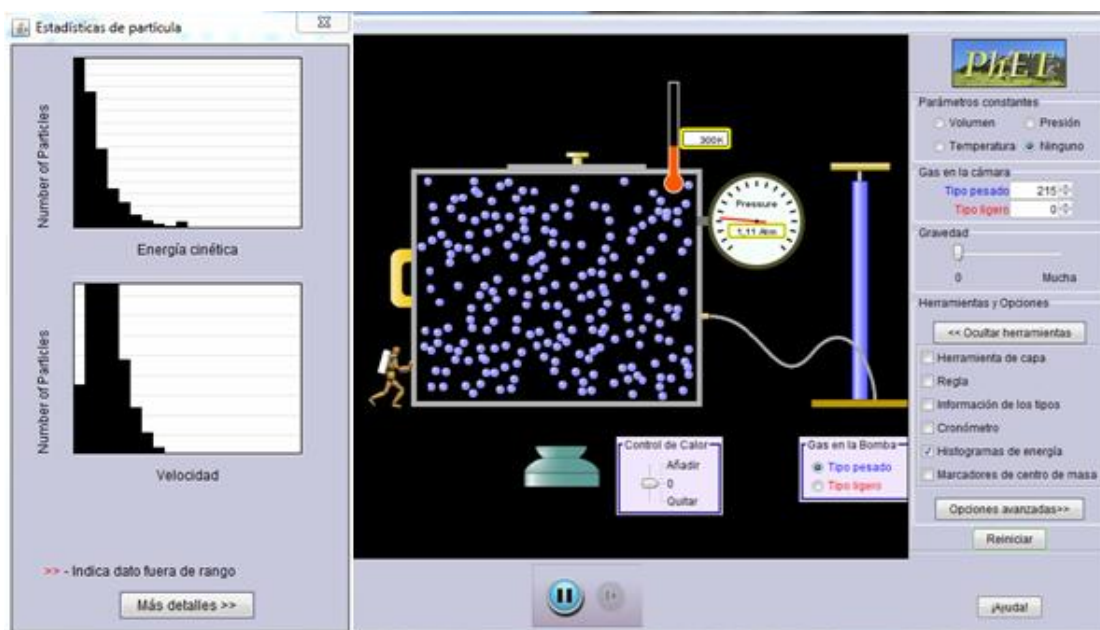


Figura 3.8: Applet Propiedades del Gas (PHET)

La simulación denominada *Propiedades del Gas* (Fig. 3.8), muestra un recipiente con una bomba, un termómetro, un manómetro y la posibilidad de cambiar el volumen del recipiente. La bomba contiene moléculas de un gas pesado y de un gas liviano cuya masa se puede graduar desde una ventana. Se puede variar la temperatura del sistema poniéndolo en contacto con una llama. Inicialmente se inyecta en el recipiente una cierta cantidad de moléculas de gas que interactúan entre sí y mediante los controles necesarios de los parámetros que intervienen se puede visualizar información sobre el número de moléculas de gas y su velocidad media, tiempo de la experiencia mediante un cronómetro, histogramas de energía para visualizar el comportamiento estadístico del número de partículas en función de la velocidad y de la energía cinética, como así también marcadores de centro de masa.

3.2.3 Processi Termici ed Entropía (PROTERM)

PROTERM es una secuencia didáctica que plantea el estudio de los procesos térmicos estableciendo relaciones entre el mundo macroscópico y el mundo microscópico. Ha sido desarrollado por el grupo GRIAF, conducido por la profesora Rosa María Sperandeo Mineo.

Incluye contenidos desarrollados bajo un formato de hipertexto complementados con simulaciones. Comprende dos módulos: “Procesos Térmicos” y “Entropía y Transformaciones”. Este último presenta una introducción a la entropía desde el enfoque estadístico.

La propuesta del grupo de investigación no es establecer un lineamiento rígido de utilización del recurso, sino ofrecer herramientas que cada profesor podrá adecuar. El sitio presenta doce páginas, donde se discuten distintos conceptos mediante ejemplos y herramientas diversas.

Los investigadores presentan una red conceptual (figura 3.12), que muestra el recorrido elegido para desarrollar los principales conceptos del enfoque microscópico, a partir del análisis de un sistema termodinámico (en particular un gas ideal). La propuesta didáctica tiene en cuenta la distribución espacial (posiciones) y la distribución de energía (velocidades) de las partículas intervinientes. Para calcular la entropía del gas propone contar los microestados del sistema, discretizando el volumen y la energía. Trabaja sobre un modelo de discos rígidos, que puede representar razonablemente el comportamiento del gas.

En las doce páginas que componen el sitio se encuentra la página Simulaciones (Simulazioni), donde se detallan las simulaciones que proponen. Algunas abordan conceptos estadísticos (configuración, frecuencia, probabilidad, microestados, macroestado) y otras están focalizadas en el modelo microscópico del sistema, para analizar su comportamiento y evolución. Imágenes representativas de los applets con una descripción somera de su función se muestran en las figuras 3.10 y 3.11.

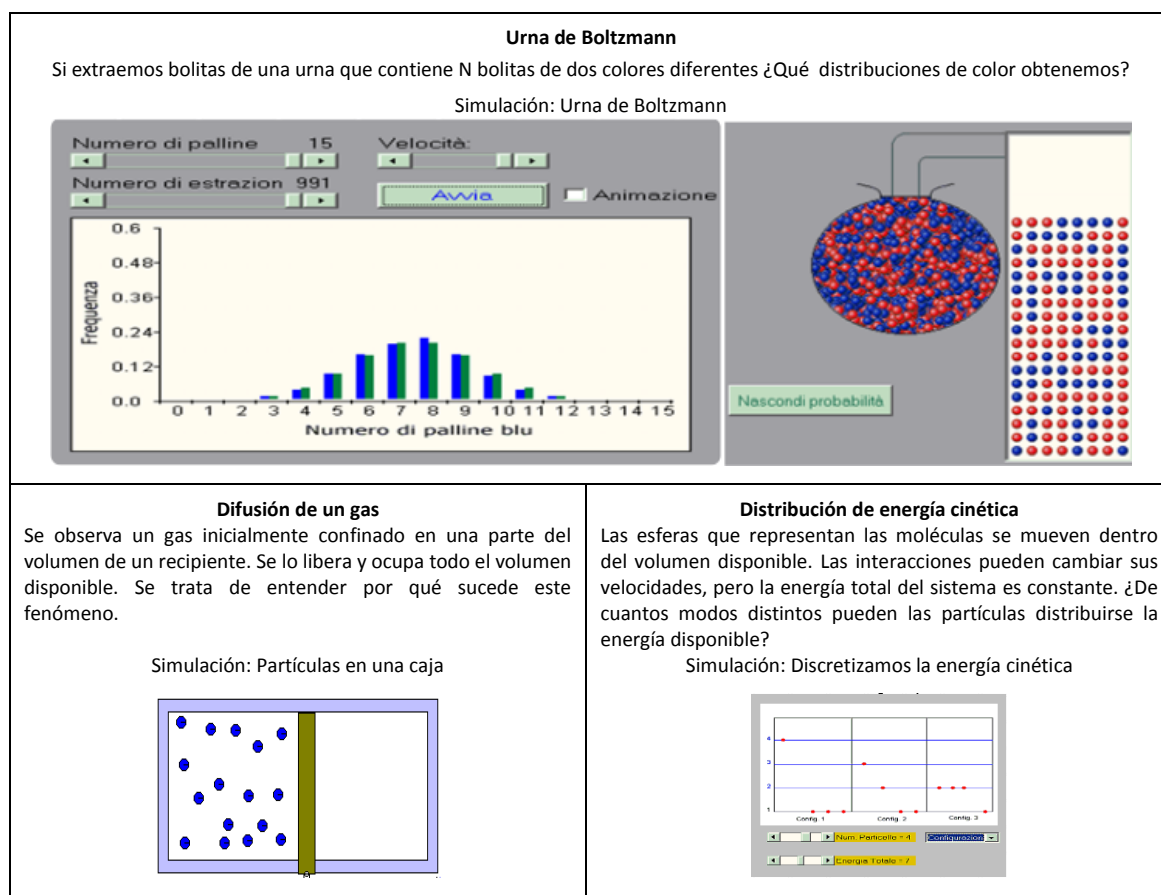
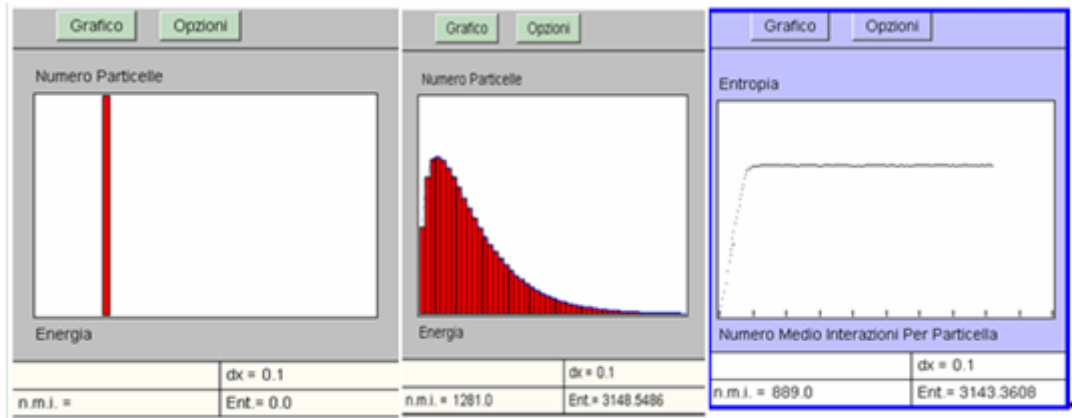


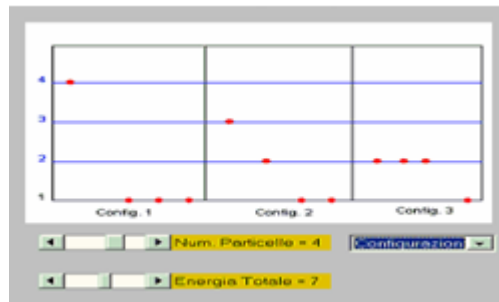
Figura 3.10: Simulaciones del Módulo Entropía y Transformación (PROTERM)

Conducción de calor, distribución de energía y entropía

Dos cuerpos a diferente temperatura, puestos en contacto térmico, luego de un tiempo determinado, alcanzan la misma temperatura. Se puede ir construyendo la gráfica de la distribución media de la energía y la gráfica de la entropía del sistema.

**Multiplicidad**

Estudia la evolución de un sistema de partículas constituido por N esferas rígidas libres de moverse en un recipiente de un volumen dado. Se asigna a las partículas condiciones iniciales relacionadas con la energía cinética. El programa asigna al azar la dirección de la velocidad inicial de las partículas y distribuye las partículas entre los diferentes niveles de energía. Se comprueba que para obtener el número total de microestados accesibles a un sistema de N partículas al que se asigna una energía total E_T debemos contar la multiplicidad de todos los posibles valores de $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ que satisfacen la ecuación: $E_T = n_1 e_1 + n_2 e_2 + n_3 e_3 + \dots + n_n e_n$ (con $n_1 + n_2 + \dots + n_n = N$).

**Tendencia al equilibrio**

Estudia la evolución de un sistema de partículas constituido por N esferas rígidas libres de moverse en un recipiente de un volumen dado. Se asigna a las partículas condiciones iniciales relacionadas con la energía cinética. La simulación permite obtener el valor de la entropía para nuestro sistema simulado.

Al iniciar el programa, las partículas se ponen en movimiento y se observa cómo se distribuyen las partículas (dispersión) de diferentes maneras manteniéndose la energía total constante. Después de un número de choques entre ellas la distribución de energía comienza a asumir una forma regular que va cambiando lentamente con el tiempo debido a pequeñas fluctuaciones. El programa muestra la distribución inicial, la distribución de equilibrio y el logaritmo de la multiplicidad en función del número medio de choques por partícula.

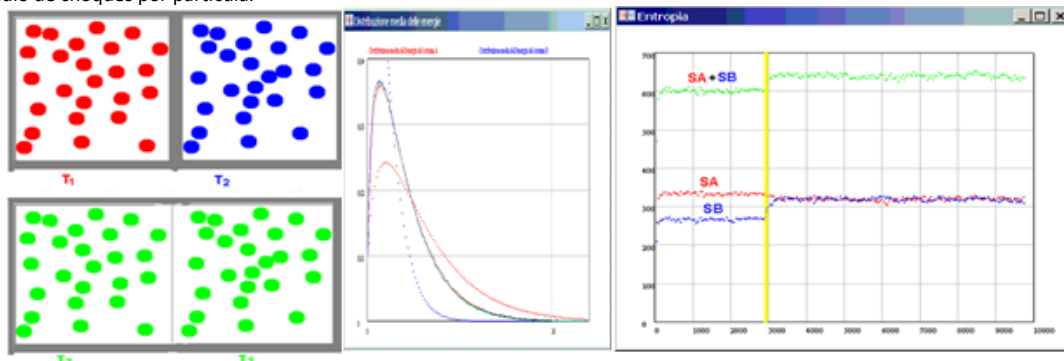


Figura 3.11: Simulaciones del Módulo Entropía y Transformación (PROTERM)

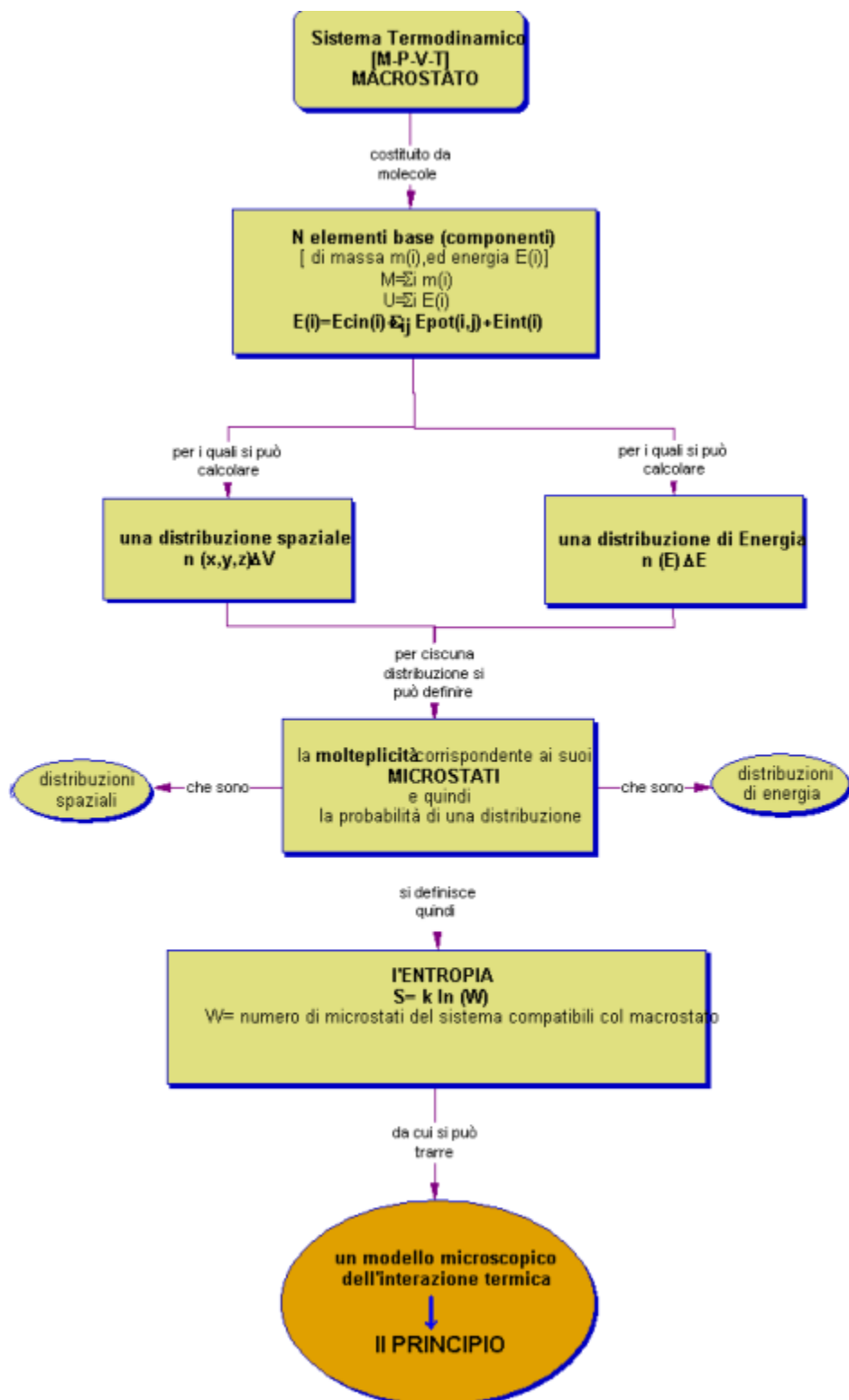


Figura 3.12 Red conceptual Entropía y Transformación. Fuente: www.griaf.unipa.it

3.2.4 Statistical Interpretation of entropy (SIE)

SIE es un conjunto de materiales curriculares y simulaciones de código abierto en Java, diseñado para ayudar a los estudiantes de física introductoria a comprender la segunda ley de la termodinámica. Las simulaciones han sido desarrolladas utilizando el sistema EJS (Easy Java Simulations).

Las actividades se orientan a lograr que los estudiantes comprendan por qué se debe esperar que la entropía de un sistema macroscópico aislado, que consta de un gran número de partículas, aumente hasta alcanzar el equilibrio. También ilustran la conexión entre ese aumento y el hecho de que la energía térmica fluye de un sistema a mayor temperatura a uno de menor temperatura (y no al revés). En un artículo publicado en *The Physics Teacher* (Timberlake, 2010) se puede encontrar una descripción detallada de la propuesta.

Las actividades están organizadas en dos partes. La primera incluye experimentos sencillos con monedas y con dados con los que se introducen nociones estadísticas, los conceptos de macroestado y microestado, y la noción estadística de la segunda ley. La segunda parte incluye simulaciones que exploraran la segunda ley más profundamente y en nuevos contextos.

Las simulaciones y otros materiales curriculares están contenidos dentro de un paquete que se ejecuta como un programa autónomo en Java. Cada simulación está acompañada por un tutorial en el que se plantean actividades a realizar por los estudiantes.

El paquete incluye cuatro simulaciones: Coin flip equilibrium (Tirada de monedas); Hot and cold Ideal gases (Gases ideales “fríos” y “calientes”), Ideal gas expansion (Expansión de un gas ideal) e Ideal gas Maxwell- Demon (Demonio de Maxwell).

Coin flip equilibrium *simula un sencillo sistema de monedas dispuestas en filas ordenadas*. Todas las monedas están inicialmente con la cara hacia arriba. Para cada paso de la simulación, una o más monedas son elegidas al azar y se las da vuelta. En ventanas separadas se muestran el conjunto de monedas, un gráfico del número de caras / cruz después de cada paso; la “entropía” del sistema después de cada paso, y un histograma de lo que va sucediendo para un determinado número de caras. El usuario puede cambiar el número total de monedas y el número de monedas que se dan vuelta en cada paso de la simulación.

Hot and Cold Ideal Gases presenta un modelo en dos dimensiones de la mezcla de dos gases ideales a diferente temperatura. Uno de ellos inicialmente está confinado del lado izquierdo y el otro del lado derecho del recipiente. Una ventana de animación muestra el movimiento de las partículas en la caja, mientras que otra gráfica nos muestra como varía la temperatura como medida de la energía cinética de las partículas en cada división de la caja.

Ideal Gas expansión modela un gas ideal en una caja de dos dimensiones. Inicialmente las partículas están todas a la izquierda de la caja con posiciones al azar y velocidades aleatorias (distribuidas de acuerdo a la distribución de Maxwell). Una ventana muestra una animación del movimiento de las partículas y otra muestra una gráfica del número de partículas en cada lado de la caja en función del tiempo.

Ideal Gas Maxwell Demon presenta también un modelo de gas ideal de dos dimensiones, pero ahora monitoreado por el demonio de Maxwell. El recipiente está dividido en dos partes por un tabique con una "puerta" que un “ser diminuto”, puede abrir y cerrar cuando quiera, dejando pasar las moléculas más rápidas hacia un lado y las más lentas hacia el otro. De esta forma, se conseguirá elevar la temperatura de un lado y bajar la del otro sin efectuar trabajo. Una ventana muestra la animación de las moléculas en la caja, mientras que en otra se grafica la temperatura del gas en cada lado de la caja (rojo a la izquierda y azul a la derecha) en función del tiempo. La gráfica permite observar la violación del Segundo Principio de la Termodinámica.

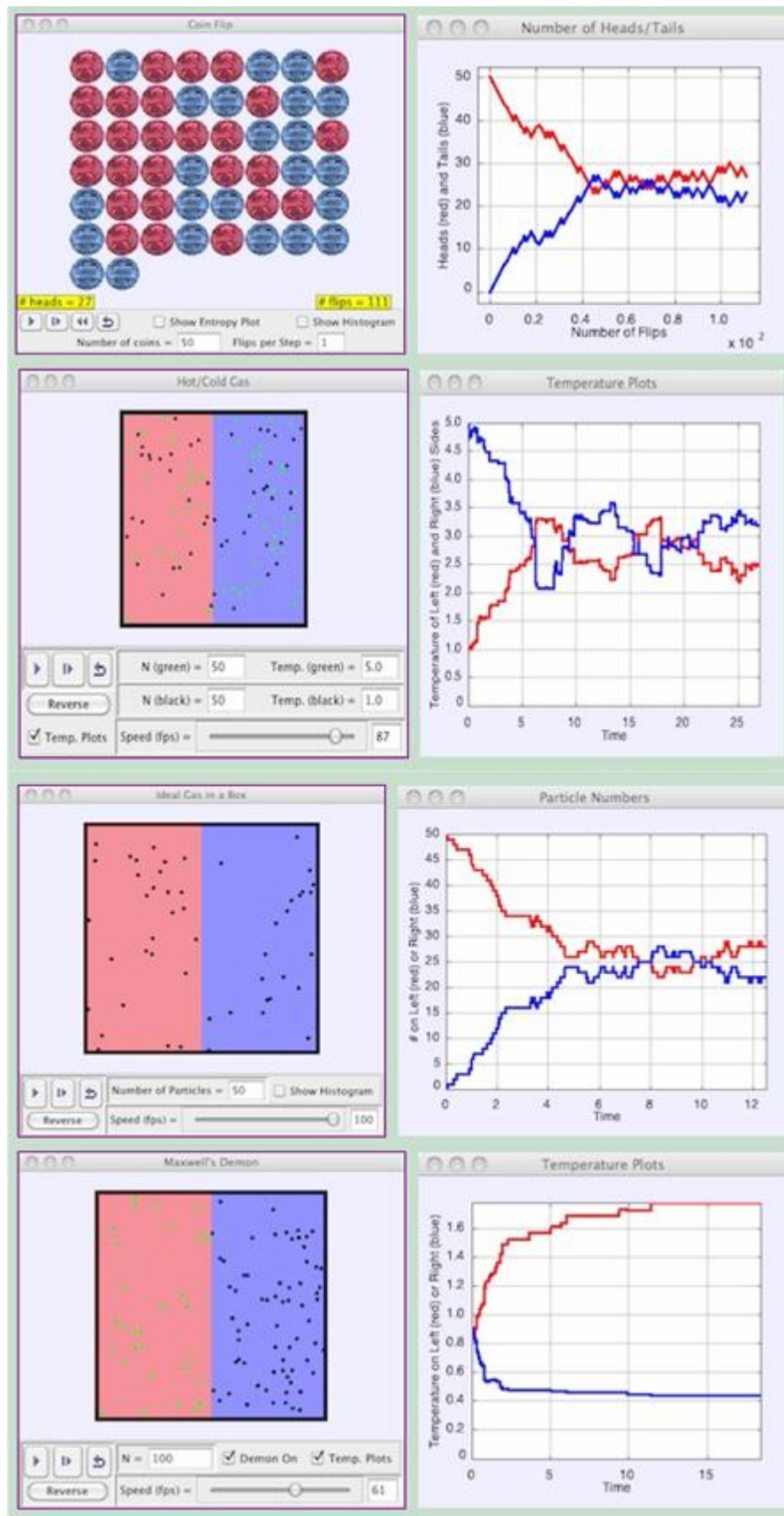


Figura 3.13: Applets Tirada de monedas; Gases ideales fríos y calientes; Expansión de un Gas Ideal; Demonio de Maxwell (SIE)

3.2.5 Statistical and Thermal Physics (STP)

STP es una colección de recursos para la enseñanza de Física Estadística y Térmica que, por su amplitud y desarrollo, excede lo pretendido para una presentación del tema de física básica, siendo más apropiado para el nivel de un curso de Licenciatura en Física. No obstante las simulaciones son sencillas y fáciles de utilizar.

El usuario puede ejecutar estos programas como applets en un navegador o descargarlos como una aplicación independiente (archivo jar).

El objetivo de las simulaciones es ilustrar algunos de los conceptos fundamentales de la mecánica estadística. Pueden ser utilizados de manera independiente, o en conjunto con el texto online Física Estadística y Térmica de Harvey Gould y Jan Tobochnik. También complementa el libro de Daniel Schroeder: "Introducción a la Física Térmica", Addison-Wesley (2000).

Las simulaciones presentadas en la página y las hojas de trabajo que guían a los estudiantes a realizar la actividad están disponibles libremente como una parte de la colección Open Source Physics en la librería digital ComPADRE. Los recursos están organizados según los capítulos del libro antes mencionado.

Entre todas las simulaciones disponibles, consideramos importante mencionar el paquete Approach to equilibrium (Aproximación al equilibrio), de interés para nuestro trabajo.

Es un paquete que contiene tres simulaciones interesantes donde se exploran algunas propiedades cualitativas de los sistemas macroscópicos según el comportamiento colectivo de las partículas que lo componen. Dichas simulaciones son: Particles in a box (Partículas en una caja); Three partitions (Tres particiones) y Two partitions (Dos particiones).

La primera de ellas plantea una caja dividida en dos compartimentos donde a la izquierda se encuentra una cierta cantidad de partículas y a la derecha se ha hecho el vacío. Ambas partes están divididas por un tabique y en un instante determinado éste se abre. Las partículas pasan de un macroestado de equilibrio inicial a otro final en el que la mayor parte del tiempo las partículas se reparten en partes por igual en ambos compartimentos.

En la segunda simulación se tiene igual cantidad de partículas en tres compartimentos, y al sacar los tabiques que los separan, las partículas se mezclan generando una distribución homogénea.

En la tercera simulación se divide la caja en dos mitades con igual cantidad de partículas en cada compartimento y al sacar el tabique, las partículas se mezclan llegando a un macroestado final de equilibrio.

Las tres simulaciones muestran una ventana donde se visualiza el comportamiento del sistema, mediante una gráfica que representa el número de partículas en un determinado compartimento en función del tiempo.

En el macroestado de equilibrio se perciben fluctuaciones, cuya variación depende de la cantidad de partículas involucradas en la experiencia.

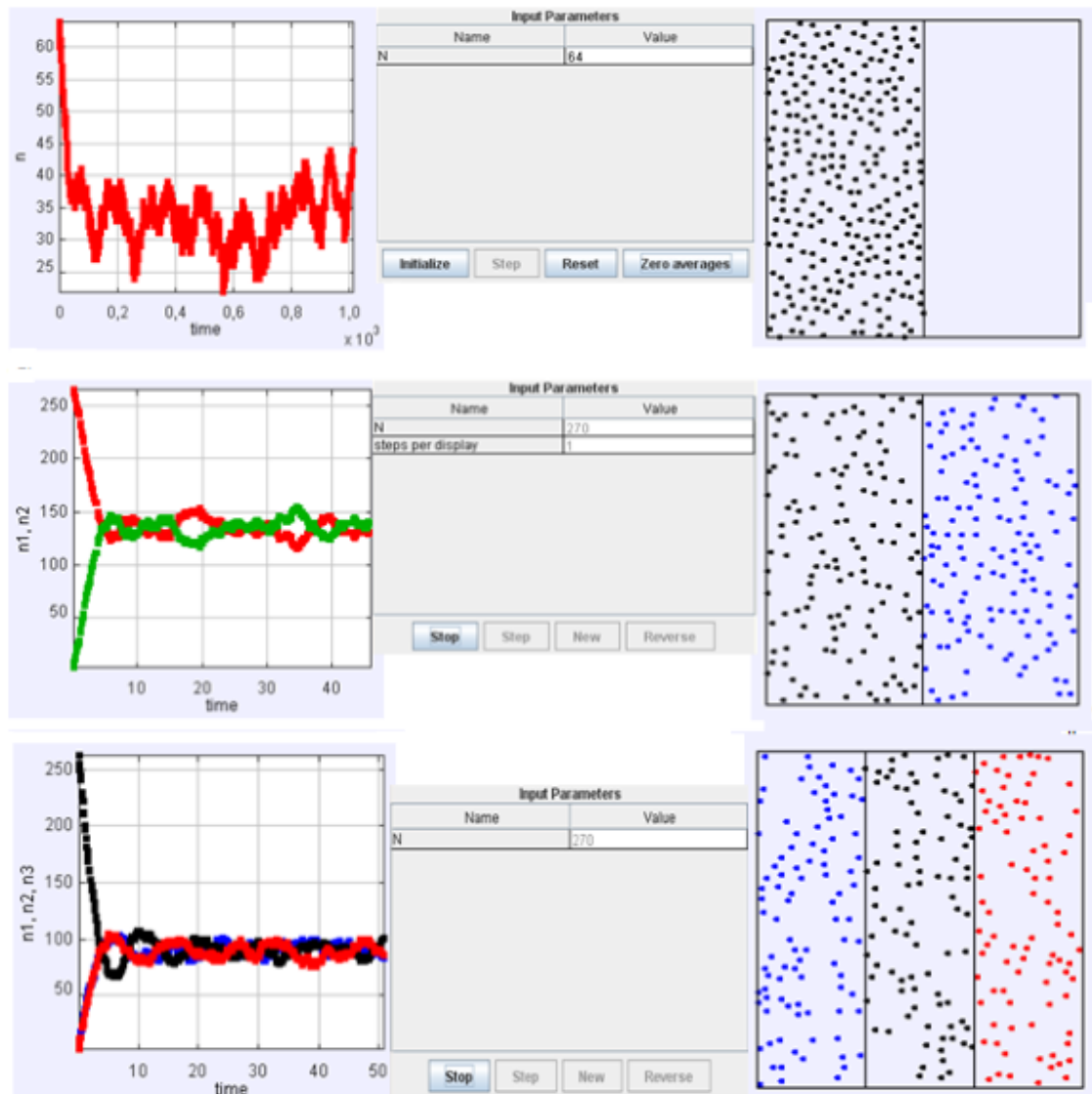


Figura 3.14 Simulaciones Aproximación al equilibrio, del paquete STP

3.2.6 Experimentos Interactivos en Sistemas Físicos Complejos.

Es un conjunto de simulaciones desarrolladas por la Universidad Complutense de Madrid, dentro de un curso denominado Experimentos Interactivos en Sistemas Físicos Complejos. El curso pretende mejorar la comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en sistemas formados por un número muy grande de partículas, típicamente del orden del número de Avogadro. Está dirigido a alumnos universitarios que cursen las asignaturas de Física del Estado Sólido, Física Estadística, Sistemas fuera del Equilibrio y Dispositivos Cuánticos.

Experimentos Interactivos presenta 11 simulaciones de Física Estadística, cada una de ellas acompañada por un sustento teórico del tema tratado y por los desarrollos matemáticos correspondientes. Las simulaciones son:

1. Teorema del Límite Central.
2. Anillo de Kac.
3. Transformaciones del Panadero y de Arnold.
4. Ergodicidad y Entropía en un conjunto de osciladores.
5. Dimensionalidad y Límite Termodinámico en el Modelo de Ising.
6. Moléculas Diatómicas.
7. Vibraciones en sólidos cristalinos; Teoría de Debye.

8. Irreversibilidad y Fluctuaciones en Equilibrio.
9. Colectividad Macrocanónica.
10. Estadísticas de Bosones y Fermiones.
11. Modelo de Ising.

Irreversibilidad y Fluctuaciones en el Equilibrio (la única relevante para nuestros propósitos) muestra una representación bidimensional de moléculas, modelizadas como discos duros, ubicadas en una caja que está dividida por un tabique en dos compartimientos. Las moléculas están ubicadas inicialmente en la mitad izquierda. Al sacar el tabique, se expanden hasta ocupar todo el recipiente.

Pulsando “Inicia”, comienza la evolución en la que el gas se expande y llena la totalidad del recipiente. Una ventana muestra la diferencia entre el número de partículas ubicadas a la izquierda y a la derecha de la caja, en función del tiempo. El botón “Histograma” abre una ventana con la distribución de la diferencia entre el número de partículas en la zona izquierda y derecha (fig. 3.15)

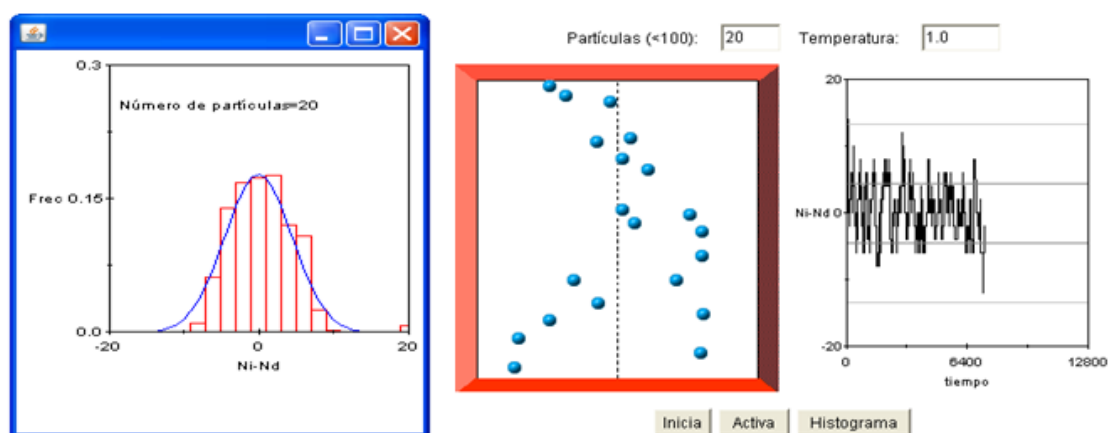


Fig. 3.15 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio

3.3 IMPLICACIONES DEL ANÁLISIS PARA ABORDAR NUESTRA EXPERIENCIA.

Los sitios recorridos muestran simulaciones relevantes para los propósitos que planteamos en nuestro trabajo. Sin embargo, y en coherencia con nuestra visión sobre el uso de simulaciones desarrollada al comienzo de este capítulo, es importante tener en cuenta el contexto en que van a utilizarse y las intenciones educativas pretendidas.

En nuestro caso, la idea central acordada con los docentes de la cátedra de Física II fue elaborar un trabajo práctico basado en simulaciones (applets) que permitiera reforzar los conceptos que los docentes desarrollan en la primera clase dedicada a Entropía. Es decir, generar actividades con las simulaciones que ayudaran a comprender adecuadamente los conceptos de microestado, macroestado y multiplicidad, entender y aplicar en situaciones sencillas la expresión de la entropía de Boltzmann e interpretar las nociones de equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad.

La tarea fundamental fue, entonces, seleccionar las simulaciones adecuadas y, especialmente, la elaboración cuidadosa de una guía de actividades que permitiera lograr los objetivos planteados.

Esa tarea fue realizada, y el trabajo práctico se implementó en una comisión como actividad adicional a las normalmente programadas en el dictado de la asignatura. Las simulaciones seleccionadas y las actividades propuestas, junto con un análisis preliminar de su potencialidad didáctica, se discuten en el siguiente capítulo.

Índice

- 4.1. El contexto de la experiencia: La actividad propuesta**
 - 4.2. Los applets utilizados**
 - 4.3. Análisis a priori del dispositivo implementado**
 - 4.3.1. Urna de Boltzmann**
 - 4.3.2. Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio**
 - 4.3.3. Tirada de Monedas**
 - 4.3.4. Multiplicidad**
 - 4.4. Hipótesis preliminares sobre la idoneidad didáctica del dispositivo**
-

En este capítulo nos encontraremos con el detalle de la experiencia realizada; el contexto donde se realizó y el análisis a priori sobre la idoneidad didáctica de la propuesta. Para realizar dicho análisis se elaboró un cuestionario específico, que se aplicó a cada una de las cuatro actividades planteadas en el trabajo práctico.

4.1 EL CONTEXTO DE LA EXPERIENCIA: LA ACTIVIDAD PROPUESTA

Como ya hemos comentado, la experiencia fue realizada en un curso de física básica para carreras de ingeniería donde, desde hace años, se desarrolla termodinámica desde una perspectiva microscópica. La misma fue realizada en un trabajo conjunto con dos profesores de la cátedra y planteada como una actividad adicional, incorporada a las que venían desarrollándose tradicionalmente. La expectativa de los profesores era complementar las clases teóricas y prácticas con actividades innovadoras, que incorporaran simulaciones. Pretendían con ello lograr una mayor comprensión por parte de los estudiantes del concepto de entropía, que en el curso es definida a partir de la formulación de Boltzmann.

A partir de la búsqueda de simulaciones y applets realizada, en la que participaron los profesores, finalmente se seleccionaron cuatro. Se elaboró una guía de actividades que los alumnos debían realizar utilizando cada una de las simulaciones seleccionadas. La guía está organizada en cuatro apartados (una por cada applet). En cada apartado se incluye una introducción donde se explica la operatividad de la simulación, los objetivos que se persiguen con cada una de ellas y por último se detallan las actividades que los estudiantes tuvieron que realizar. Dicha guía se presenta en el Anexo A.

El dispositivo didáctico se organizó como un trabajo práctico que los estudiantes debían realizar fuera de clase. Se les entregó el material (simulaciones y guía de actividades) en discos compactos. Además fue alojado en el sitio web de la cátedra, desde donde podía descargarse libremente.

Se realizó con los estudiantes un encuentro inicial donde, además de mostrar al curso las simulaciones, se enfatizaron aspectos considerados relevantes en el uso de las mismas, se explicaron las consignas de trabajo y se establecieron pautas generales sobre las actividades a realizar. Se propuso a los alumnos trabajar con las simulaciones según las indicaciones planteadas en la guía, responder las preguntas incorporadas en ellas, orientadas a analizar los resultados y elaborar conclusiones.

Se acordó con los estudiantes un tiempo de una semana para interactuar con las prácticas y entregar un informe del trabajo realizado en función de lo indicado. Los estudiantes debían conformar grupos de trabajo integrados como máximo por tres alumnos y entregar en forma

impresa la actividad realizada. Se conformaron en total 14 grupos. Todos entregaron el trabajo por escrito, en el tiempo establecido.

4.2 LOS APPLETS UTILIZADOS

Se describen a continuación los applets utilizados y las actividades propuestas en cada caso. En la Figura 4.1 y en la Figura 4.2 se muestran vistas representativas de las pantallas de cada uno de ellos.

Urna de Boltzmann. El applet simula la extracción sucesiva de un número N de bolitas de una urna que contiene un gran número de bolitas rojas y azules, en cantidades iguales. Las bolitas sólo se diferencian por el color. Se puede seleccionar la cantidad de extracciones que se realizarán (de 1 a 1001) y el número N de bolitas que se tomarán en cada extracción (de 2 a 216). Un gráfico cartesiano muestra la frecuencia versus el número de bolitas azules. A medida que corre la simulación, se va visualizando el proceso de extracción y el correspondiente cambio en el gráfico de frecuencias, fijando en forma creciente la cantidad de bolitas a extraer y la velocidad de extracción. La guía elaborada incluye una serie de actividades y preguntas, tendientes a distinguir frecuencia y probabilidad; adquirir conceptos de macroestado, microestado y multiplicidad. Con la ayuda de una planilla de cálculo se pide completar tablas y representar gráficamente multiplicidad y probabilidad, observar la cantidad de configuraciones posibles, discutir conceptos y registrar lo hecho en un informe.

Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio. El applet simula la expansión libre de un gas para mostrar que el comportamiento irreversible está asociado a que el sistema está compuesto por un número elevado de grados de libertad. También permite observar las fluctuaciones de densidad que se producen en el equilibrio. Muestra un recipiente bidimensional en el que se representan las moléculas del gas (discos duros), ubicadas, en el inicio, en la mitad izquierda del recipiente. Al correr la simulación, el “gas” se expande y va ocupando la totalidad del recipiente. La guía proponía analizar el sistema para muchas y pocas partículas, visualizar histogramas, capturar imágenes y observar fluctuaciones en el equilibrio. Capturar las imágenes de la representación gráfica del comportamiento de la diferencia entre las partículas del lado izquierdo y las partículas del lado derecho del recipiente, es decir $N_l - N_d$ en función del tiempo para diferente número de partículas y compararlas observando las dos gráficas simultáneamente con el ícono conteniendo las partículas correspondientes.

Tirada de monedas. El applet modela un sistema simple de N monedas dispuestas en filas ordenadas. Inicialmente todas las monedas están con la cara hacia arriba. En cada paso de la simulación una moneda es elegida al azar y dada vuelta. Una ventana de animación muestra el conjunto de monedas (con las caras en color rojo, y cruces en color azul). Se muestra gráficamente el número de caras (en rojo) y cruces (azul) en función del tiempo (en realidad, en función del número de pasos realizados). Dos botones en la consola principal permiten además abrir dos ventanas en las que se representa el histograma de frecuencias (del número de veces que el sistema ha tenido un determinado número de caras hacia arriba) y la “entropía” del sistema, calculada como $S = \ln \Omega$ (adopta $k = 1$). El usuario puede cambiar el número total de monedas (de 2 a 2000) colocando el número deseado en la ventana. También puede establecerse el número de monedas que el sistema da vuelta (flips) en cada paso (step), colocando el número deseado en Flips por Step (un valor grande hace que la simulación funcione más rápido). Particularmente la propuesta pretende profundizar las características del equilibrio en un sistema análogo al caso de las partículas en la caja, analizar como varía la entropía del sistema en función del tiempo y observar el comportamiento de la entropía para valores chicos y grandes de N .

Multiplicidad. El applet hace referencia a un sistema de N partículas con energía total E_{tot} , constante. Las partículas pueden ubicarse en diferentes niveles discretos de energía. Se pueden variar los valores de N y E_{tot} y observar las diferentes configuraciones de las partículas.

respecto de la ocupación de los niveles de energía (macroestados), así como los diferentes microestados asociados a cada una de ellas. Se puede reconocer el macroestado de mayor probabilidad ($\Omega_{\max}$) y asociarlo con la situación de equilibrio. Se interpretan las fluctuaciones en el equilibrio a partir de las probabilidades de los diferentes macroestados. Se observa que para un número N pequeño, las fluctuaciones son grandes. A la inversa, con N grande el macroestado de equilibrio es dominante. Se sugirió a los alumnos proceder del siguiente modo: Trabajar con 4 partículas y una energía total igual a 8. Analizar todas las configuraciones posibles, así como los diferentes modos en que las partículas pueden disponerse en cada configuración (macroestado). Se les pidió también completar una tabla donde se identificara cada macroestado y el número de microestados correspondientes y analizar el caso extremo admitido por el applet (máximo de 5 partículas y energía total igual a 11).

4.3 ANÁLISIS A PRIORI DEL DISPOSITIVO IMPLEMENTADO

El análisis a priori consideró el dispositivo propuesto elaborando hipótesis sobre su idoneidad para regular el comportamiento de los estudiantes orientado a la construcción de los conocimientos esperados.

Se buscó identificar cuáles eran los elementos del significado puestos en juego a través de las actividades propuestas (situaciones-problema; lenguaje; técnicas; conceptos; propiedades; argumentos) y analizar en qué medida ellos guardan correspondencia con los significados institucionales pretendidos (idoneidad epistémica) y son accesibles y alcanzables por los estudiantes (idoneidad cognitiva).

Tal como explicitamos en el capítulo 1, el análisis a priori, se realizó tomando como base un cuestionario aplicado al recurso, adoptado de la propuesta de Godino, Recio, Roa, Ruiz y Pareja (2005). Las preguntas del cuestionario se indican en el cuadro 4.1.

¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso? ¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse? ¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas? ¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan la oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)? ¿Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades/acciones/técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad? ¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta? ¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet? ¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable? ¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen? ¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

Cuadro 4.1 Cuestionario aplicado al recurso

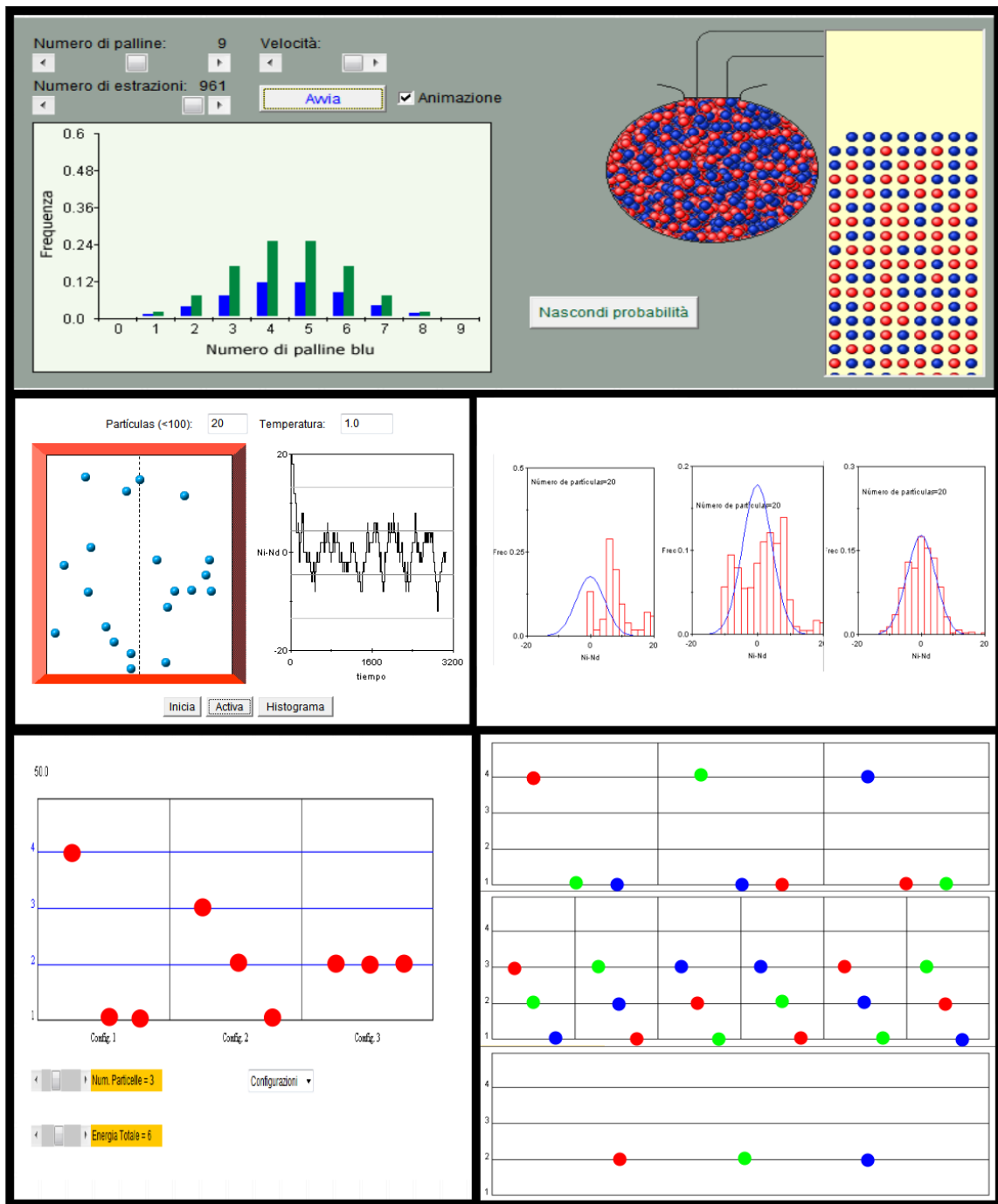


Figura 4.1: Imágenes representativas de los applets utilizados: Urna de Boltzmann (arriba); Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio (medio); Multiplicidad (abajo)

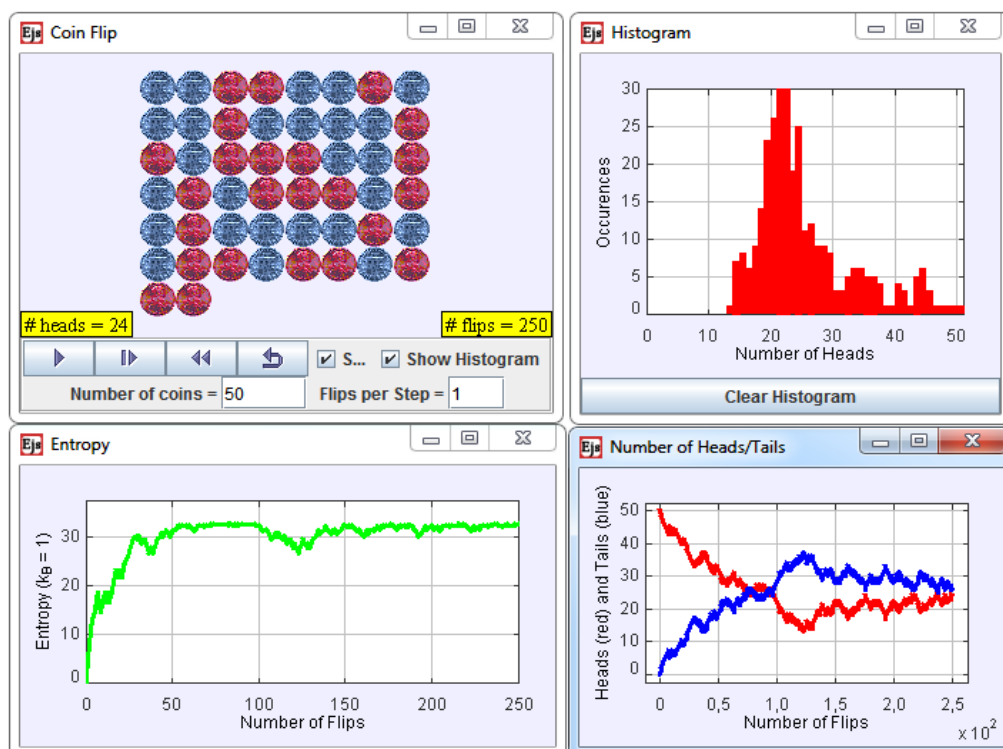


Figura 4.2: Imágenes representativas del applet: Tirada de Monedas

4.3.1 Urna de Boltzmann

¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso?

La situación problema tratada corresponde a analizar y estudiar las probabilidades. El applet muestra una urna con bolitas rojas y azules que permite a través de una serie de botones contabilizar el número de bolitas a extraer y la cantidad de extracciones a realizar. Permite visualizar gráficos de barras donde se representa la frecuencia y la probabilidad.

¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse el recurso?

El applet requiere al menos una noción básica de probabilidad; capacidad de lectura de histogramas de frecuencia y distinción entre probabilidad y frecuencia.

Algunos alumnos dependiendo de la carrera que estén cursando simultáneamente tienen estas nociones, pero otros debieron consultar bibliografía al respecto.

¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas?

La actividad promueve el análisis de las gráficas e imágenes obtenidas para diferente número de bolitas. La actividad se operativiza en un nivel de dificultad que va llevando lentamente a inferir una distribución normal. El applet permite observar como varían los histogramas de frecuencia al variar el número de bolitas y el número de extracciones, promoviendo de esta manera su aplicación a situaciones relacionadas. Hay una relación entre los conceptos desarrollados en las clases y la actividad.

¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan la oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)?

La exploración de la simulación; el criterio utilizado para determinar cuándo las gráficas de probabilidad y frecuencia se aproximan entre sí y como cambia la curva de probabilidad con el aumento del número de bolitas extraídas, pone de manifiesto la incidencia del número de partículas del sistema en la conformación de los macroestados y microestados.

¿Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades/ acciones/técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad?

El applet permite elegir y observar el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de bolitas. En todos los casos permite observar los cambios que se producen en las ventanas disponibles. La utilización de una planilla Excel permite analizar casos correspondientes a determinados número de bolitas, permite representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad para cada caso. Esta organización permite operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad e inferir la forma que adoptarían las gráficas si N fuese enormemente grande.

¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta?

El lenguaje en el applet es básicamente icónico. Lenguaje visual presente a través de una ventana con una animación (urna con bolitas rojas y azules) y simulación para observar el proceso de extracción y conformación de macroestados. Gráficos cartesianos de probabilidad y frecuencia. Al introducir datos de velocidad de extracción, número de bolitas a extraer y número de extracciones a realizar, se activa una animación interactiva.

¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet?

El applet requiere al menos una noción básica de probabilidad; capacidad de lectura de histogramas de frecuencia y distinción entre probabilidad y frecuencia.

Básicamente se pretende verificar la diferencia en el comportamiento del sistema para valores grandes y pequeños de N . Distinguir entre probabilidad y frecuencia. Adquirir concepto de configuración, macroestados y microestados.

Ideas principales: La ventaja de esta simulación radica en que pone en un mismo nivel de análisis la muestra de histogramas que se construyen mientras el sistema se pone en marcha. Muestra la gráfica de frecuencia y probabilidad en función del número de bolitas azules extraídas. La multiplicidad (Ω) puede determinarse fácilmente contando los microestados correspondientes a cada macroestado. Al ir elevando el número de bolitas a extraer se hace necesario contar con una expresión general que permita hacer el cálculo. Como nos interesa el número de modos distintos en que podemos extraer N bolitas con una configuración determinada y sin importar el orden en que fueron extraídas, se explica el modelo a utilizar.

¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable

Los conceptos previos necesarios para abordar la actividad fueron trabajados en las clases teórico prácticas. Los estudiantes han abordado la actividad sin dificultades.

¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen?

Las definiciones, procedimientos y proposiciones están adaptados al nivel educativo al que se dirigen de modo que se espera que articuladas con las actividades siguientes, emerjan y se afirmen los nuevos conocimientos esperados.

¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

La argumentación es inductiva a través de la observación concreta de una ventana de animación que muestra la urna conteniendo un número de bolitas rojas y azules. El usuario cambia el número total de bolitas a extraer y una vez que comienza a correr la simulación puede abrir las ventanas para observar el histograma de frecuencias (del número de veces que el sistema ha tenido un determinado número de bolitas azules extraídas). A partir de los gráficos pueden establecerse apreciaciones que van desde los casos en que las gráficas de probabilidad y frecuencia se aproximan entre sí a la observación del cambio de la curva de probabilidad con el aumento del número de bolitas extraídas. La Figura 4.3, sintetiza la configuración epistémica de referencia asociada al uso de la Urna de Boltzmann.

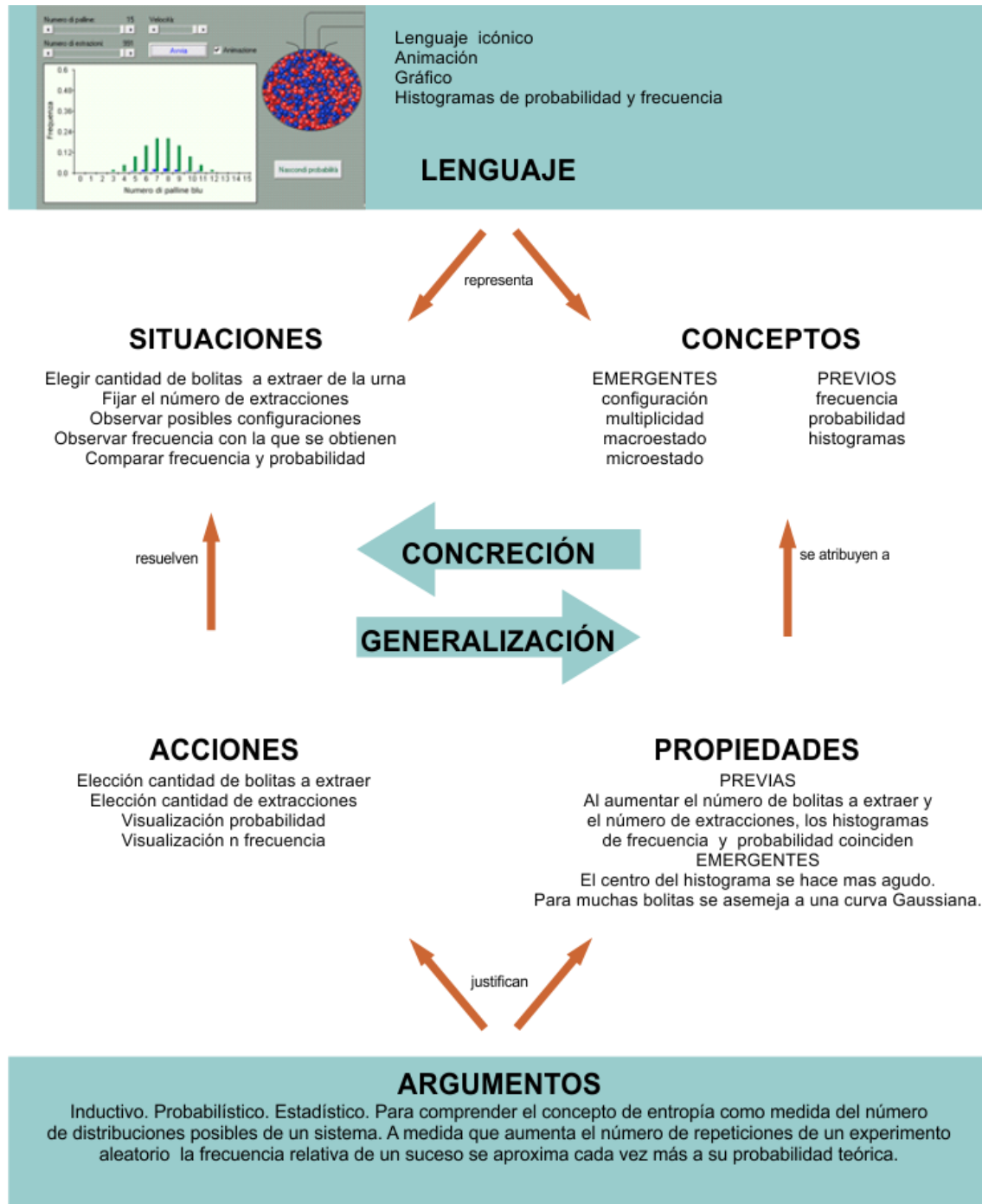


Fig. 4.3 Configuración epistémica asociada a la Urna de Boltzmann

4.3.2 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio

¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso?

La situación problema planteada es la de una caja bidimensional con un tabique por la mitad, donde en una mitad se encuentran discos rígidos que representan las moléculas que componen un gas. Se saca el tabique y se puede visualizar el comportamiento de los discos rígidos modificando la cantidad de partículas y la temperatura. Para cada caso se considera la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo. Se puede describir de modo cualitativo el comportamiento de $(N_i - N_d)$ en función del tiempo en el equilibrio. Se observan las variaciones o fluctuaciones en la gráfica. Se observa el valor medio de $N_i - N_d$. Para cada situación, es posible abrir una ventana que muestra la gráfica de frecuencia versus $N_i - N_d$.

¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse el recurso?

El applet requiere al menos una noción básica de probabilidad; capacidad de lectura de histogramas de frecuencia y distinción entre probabilidad y frecuencia.

Se supone que luego de haber realizado la Actividad 1 (Urna de Boltzmann) han adquirido estos conceptos.

¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas?

La actividad muestra la evolución de un gas. Promueve el análisis de las gráficas e imágenes obtenidas para diferente número de partículas. La actividad se operativiza en un nivel de dificultad que va llevando a caracterizar la situación de equilibrio y la presencia de fluctuaciones en el equilibrio. Posibilita verificar que una de las condiciones necesarias para que se produzca un comportamiento irreversible, es que el sistema esté compuesto por muchas partículas.

¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan la oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)?

Se proponen situaciones en las que los estudiantes investigan el comportamiento del sistema para diferentes condiciones iniciales. Se plantea la oportunidad de problematizar y caracterizar la situación de equilibrio. Posibilita la exploración de relacionar el número de partículas intervinientes con equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad. Posibilita, también la alternativa de asociar N_i y N_d con alguna variable macroscópica, en el caso de que se tratara de las moléculas de un gas. Pueden describir el comportamiento de esa variable en el equilibrio.

Se promueve analizar la noción de equilibrio y el concepto de irreversibilidad desde una perspectiva microscópica.

Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades/ acciones / técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad?

El applet permite elegir y observar el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de partículas. En todos los casos posibilita observar los cambios que se producen en las ventanas disponibles. Para iniciar la simulación hay que fijar el número de partículas y la temperatura. Una vez que se inicia la simulación, para un tiempo y paso a elección, el botón pausa detiene la animación y podemos capturar la imagen del recipiente con la cantidad de partículas que contiene y como están repartidas en el mismo; la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo y a través del botón histograma abrir una ventana con la distribución de la diferencia entre el número de partículas en la zona izquierda y derecha.

¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta?

El lenguaje en el applet es icónico. Lenguaje visual que muestra un recipiente que contiene partículas que modelizan el comportamiento de un gas ideal. Al pulsar el botón activa se observa el movimiento de las partículas en el recipiente. Simultáneamente a la derecha del recipiente una gráfica muestra el comportamiento de la diferencia entre las partículas del lado izquierdo y derecho al expandirse el gas, en función del tiempo. El pulsado de histograma muestra otra ventana que captura para cada número de partículas elegido el gráfico de frecuencia versus la diferencia entre partículas del lado izquierdo y derecho.

¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet?

El applet requiere al menos una noción básica de probabilidad; capacidad de lectura de histogramas de frecuencia.

Básicamente se pretende verificar la diferencia en el comportamiento del sistema para valores grandes y pequeños de N . Reforzar conceptos de configuración, macroestados y microestados.

Ideas principales: Caracterizar la noción de equilibrio; el concepto de irreversibilidad y la presencia de fluctuaciones, desde una perspectiva microscópica. Predecir en el equilibrio que sucede con el valor medio de las magnitudes macroscópicas que caracterizan un sistema. Observar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con N (número de partículas del sistema)

¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable?

Los conceptos previos necesarios para abordar la actividad fueron trabajados en la primera actividad. Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable que van construyendo mediante la resolución de la actividad.

¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen?

Las definiciones, procedimientos y proposiciones están adaptados al nivel educativo al que se dirigen de modo que se espera que articuladas con las demás actividades siguientes, emerjan y se afirmen los conocimientos pretendidos.

¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

La argumentación es inductiva. Una animación muestra un recipiente que contiene un gas que se mantiene en una de las mitades del mismo mediante un pistón o una pared. En un instante determinado se rompe la pared o se libera el pistón y se propone el estudio de la evolución del gas. La argumentación está basada en la experiencia que dice que el gas se expande hasta ocupar el recipiente y nunca se observa que el gas se vuelva a concentrar en una parte del recipiente. Se argumenta así que la evolución temporal conduce a un estado inicial con el gas concentrado en una región a un estado final con el gas ocupando todo el volumen, pero nunca a la inversa. Por ello la secuencia de estados tiene una dirección temporal determinada y se dice que el proceso es irreversible. También, es útil para discutir las fluctuaciones de densidad en el equilibrio.

La Figura 4.4 sintetiza la configuración epistémica de referencia asociada al uso del applet Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio.

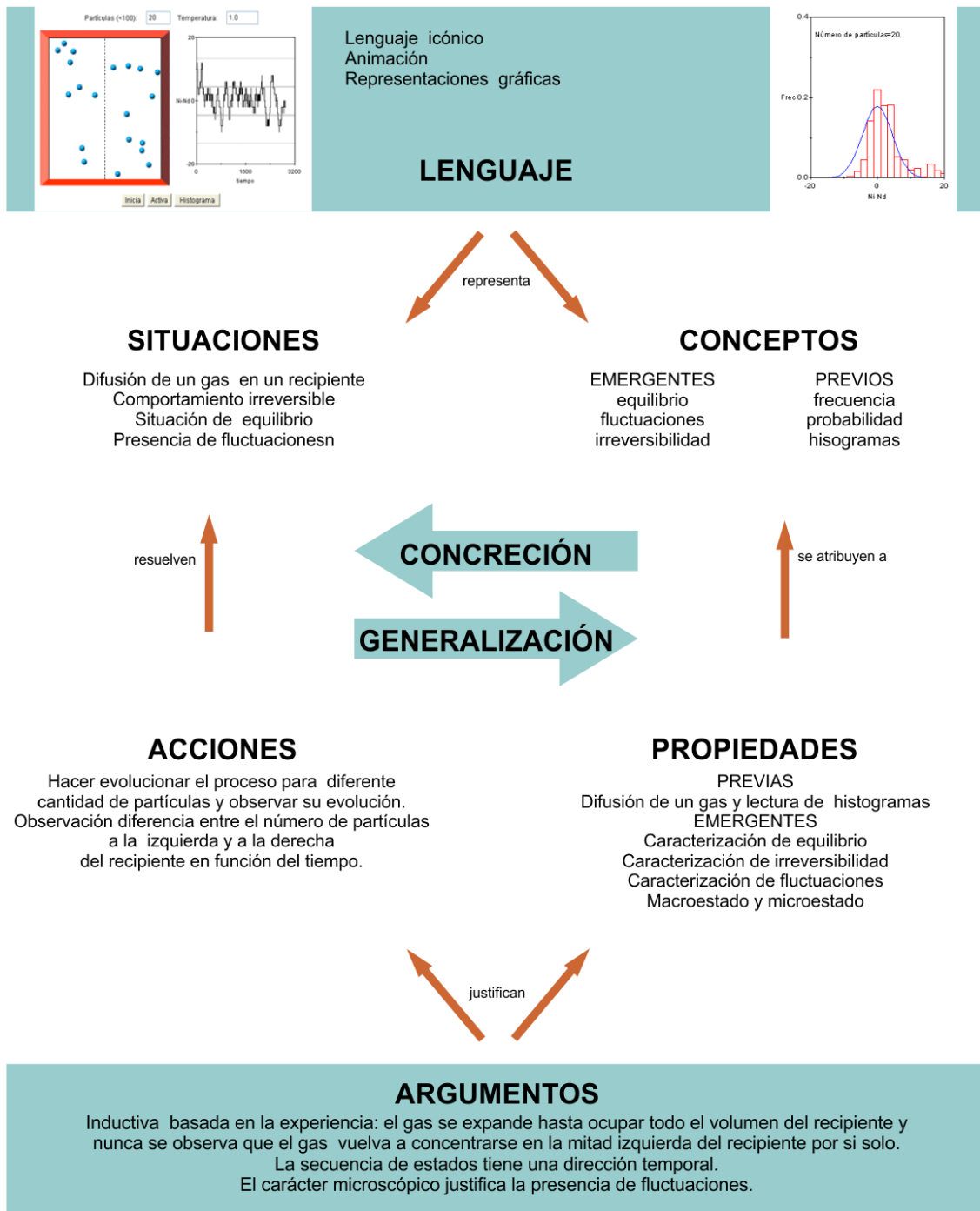


Figura 4.4: Configuración epistémica. Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio.

4.3.3 Tirada de monedas

¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso?

La situación problema corresponde a un sistema simple de n monedas dispuestas en filas ordenadas. Todas las monedas están ubicadas con la cara hacia arriba. Para cada paso de la simulación una o más monedas son elegidas al azar y se las da vuelta. Ventanas separadas muestran por un lado el conjunto de monedas; una gráfica del número de caras y cruces después de cada paso; la entropía del sistema después de cada paso y un histograma de las ocurrencias para un dado número de caras. El usuario puede cambiar el número de monedas y el número de monedas a dar vuelta en cada paso de la simulación. Posibilita profundizar las

características del equilibrio utilizando un sistema análogo al caso de las partículas en una caja y se observa las fluctuaciones en el equilibrio para valores grandes y pequeños de N . Se analiza como varía la Entropía del sistema en función del tiempo y se observa el comportamiento de $S(t)$ para valores grandes y pequeños de N .

¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse el recurso?

Es una experiencia que se apoya en las actividades anteriores en la medida que contempla la situación de equilibrio; el concepto de irreversibilidad trabajado en la actividad 2 a partir de la expansión libre de un gas ideal y las fluctuaciones. Hay una analogía con la actividad 3, en el sentido de que el número de partículas a la izquierda y derecha en aquella actividad es sustituido en esta actividad por monedas que exhiben cara/cruz. Es posible analizar el comportamiento de este sistema teniendo en cuenta la incidencia del número de componentes del sistema.

¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas?

La actividad promueve el análisis de las gráficas e imágenes obtenidas para diferente número de monedas. Determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio y lo que sucede en esa situación con respecto a las fluctuaciones. Hay un momento de la actividad planteada que busca relacionar las cuestiones tratadas en la actividad 2 con las cuestiones tratadas en la actividad 3, promoviendo de esta manera su aplicación a situaciones relacionadas. Hay una relación entre los conceptos desarrollados en las actividades anteriores y los de esta actividad.

¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan la oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)?

La exploración de la simulación; el criterio utilizado para determinar cuándo el sistema ha alcanzado el equilibrio y la ventaja de capturar imágenes que muestran el histograma de frecuencias, la gráfica de entropía del sistema en función del número de flips y la evolución del número de caras y cruces en función del número de flips, pone de manifiesto la incidencia del número de partículas del sistema en la situación de equilibrio; la observación de las fluctuaciones y el hipotético caso de que todas las monedas vuelvan a la situación original y que en algún momento el sistema pasa por los sucesivos estados de equilibrio.

¿Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades / acciones / técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad?

El applet permite elegir y observar el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de monedas. En todos los casos permite observar los cambios que se producen en las tres ventanas disponibles. Se puede seguir las simulaciones paso a paso o dejarlas correr de manera continua. Al detenerlas en un determinado momento puede interpretarse la configuración como que el sistema ha alcanzado el macroestado de equilibrio observando el comportamiento de $S(t)$ y las fluctuaciones en ese Macroestado.

La representación gráfica mostrada a los alumnos dio lugar a diferentes interpretaciones aunque válidas en lo que se refiere a la caracterización de la situación de equilibrio y la vinculación de la entropía con la multiplicidad que había sido presentada en los applets anteriores.

¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta?

Los elementos lingüísticos puestos en juego son gráficos en los que se presentan situaciones contextualizadas para observar el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de monedas. El lenguaje icónico, simbólico y verbal también está presente. Las animaciones interactivas muestran la evolución de los procesos. A través de la interfaz gráfica de usuario, el applet induce al estudiante a iniciar el proceso interactivo. En la consola se ubican los distintos controles mediante los que el estudiante le comunica a la aplicación computacional sus decisiones. El applet muestra el comportamiento en respuesta a la acción del usuario utilizando diferentes representaciones visuales. A través de objetos iconográficos se permite modificar el valor de un parámetro y/o condición inicial del modelo para definir las condiciones de funcionamiento del mismo.

¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet?

Son conceptos previos: Macroestado, Microestado, histograma de frecuencias, variación de Entropía. Algunos de estos conceptos fueron trabajados en actividades anteriores. Como conceptos emergentes, se espera profundizar características de equilibrio, comprender que existen fluctuaciones en el equilibrio y que las mismas decrecen con N (número de partículas del sistema). Básicamente se pretende verificar la diferencia en el comportamiento del sistema para valores grandes y pequeños de N. Analizar cómo varía la entropía del sistema en función del tiempo (número de flips) y observar dicho comportamiento de la entropía para valores de N grandes y pequeños.

Ideas principales: La ventaja de esta simulación radica en que pone en un mismo nivel de análisis la muestra de histogramas que se construyen mientras el sistema se pone en marcha. Muestra la gráfica de Entropía y la evolución del número de caras y de cruces a medida que se van dando vuelta las monedas que confluyen en un valor de equilibrio sujeto a fluctuaciones. Cuanto mayor es el número de monedas, menores son las fluctuaciones.

¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable?

Al igual que en las otras actividades, los conceptos previos necesarios para abordar la actividad fueron trabajados en las clases teórico prácticas y además en el contexto mismo de las actividades planteadas en el marco de las simulaciones anteriores. Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable.

¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen?

Las definiciones, procedimientos y proposiciones están adaptados al nivel educativo al que se dirigen de modo que se espera que articuladas con las actividades anteriores, emerjan y se afirmen los nuevos conocimientos esperados.

¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

La argumentación es inductiva a través de la observación concreta a través de una ventana de animación que muestra el conjunto de monedas (con las caras en color rojo y cruces en color azul). El usuario cambia el número total de monedas y una vez que comienza a correr la simulación puede abrir las ventanas para observar el histograma de frecuencias (del número de veces que el sistema ha tenido un determinado número de caras hacia arriba) y la entropía del sistema, calculada como $S = k \ln \Omega$ (adoptando $k= 1$). A partir de los gráficos pueden establecerse apreciaciones que van desde la condición de equilibrio hasta las fluctuaciones en esa situación. El establecimiento de analogías entre las actividades 2 y 3 permite relacionar

situaciones binarias asociadas a partículas del lado derecho y del lado izquierdo del recipiente con la situación de cara o cruz de las monedas para finalmente establecer una analogía con el sistema gas ideal. La figura 4.5 es una síntesis de la configuración epistémica asociada a la simulación que hemos denominado Tirada de Monedas.

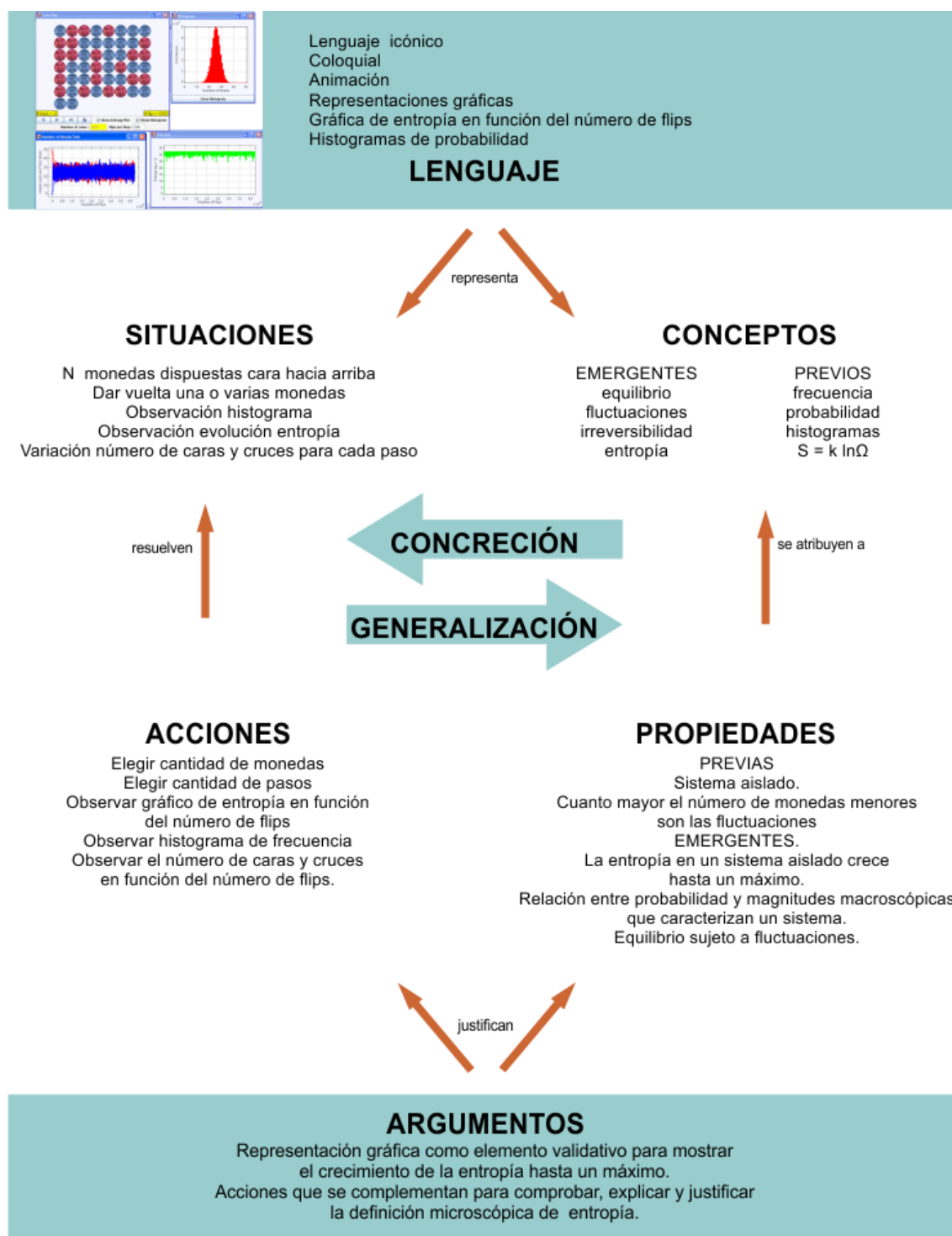


Figura 4.5: Configuración epistémica. Tirada de Monedas

4.3.4 Multiplicidad

¿Cuáles son las situaciones-problema que permite tratar el recurso?

La situación problema tratada corresponde a la distribución de un número N de partículas entre diferentes niveles discretos de energía, siendo E_t la energía total del sistema. Cada partícula puede adquirir uno de múltiples valores discretos de energía pero manteniendo la energía total del sistema constante. Se propone, dados N y E_t , analizar las diferentes configuraciones (macroestados) en que pueden organizarse las partículas en los diferentes niveles de energía y determinar la multiplicidad correspondiente a cada macroestado.

¿En qué tipo de situaciones previas se apoya o debería apoyarse el recurso?

En el contexto de la experiencia, el applet se apoya en dos actividades que fueron planteadas a los estudiantes con anterioridad. En la actividad 1 (Urna de Boltzman), los estudiantes tuvieron oportunidad de reconocer la diferencia entre frecuencia y probabilidad y observar cómo, en el fenómeno analizado, el histograma de frecuencias se aproximaba a la curva de probabilidad cuando aumentaba el número de extracciones. En la actividad 2 (Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio) los estudiantes trabajaron el concepto de irreversibilidad a partir de la expansión libre de un gas, verificando que para que se produzca ese comportamiento el sistema debe estar compuesto por un gran número de partículas; observaron los histogramas correspondientes y, las fluctuaciones que se producen en el equilibrio.

¿Posibilitan las situaciones la presentación de los enunciados y procedimientos fundamentales del tema según el significado de referencia? ¿Permiten la contextualización y ejercitación de los conocimientos que se pretende construir?, ¿Posibilitan o promueven su aplicación a situaciones relacionadas?

La actividad trata cuestiones sobre equilibrio y fluctuaciones de equilibrio en un sistema particular, considerando particiones de energía. Se analizan los macroestados vinculados a este sistema. Podría decirse que el applet Multiplicidad complementa lo actuado en el applet Irreversibilidad y Fluctuaciones en el Equilibrio: mientras en el primero se trabaja con particiones de energía, en el segundo se consideran distribuciones en el volumen.

¿Se proponen situaciones donde los estudiantes tengan la oportunidad de plantear problemas, reformularlos y/o de problematizarse (en el sentido de asumir los problemas como propios)?

El apartado “para reflexionar” planteado a los estudiantes, presenta cuestiones relevantes que buscan problematizar aspectos relevantes del tema y obtener conclusiones sobre las características y el comportamiento del sistema modelizado. El abordaje de esas cuestiones ayuda a reflexionar sobre la incidencia del número de partículas del sistema en la estabilidad del estado de equilibrio.

¿Qué variables de tarea permite operativizar el applet? ¿Qué actividades/acciones/técnicas, propone el recurso para realizar, organizar, operativizar las situaciones problema planteadas en la actividad?

El applet permite establecer los valores de N (hasta un máximo de 5) y E_t (máximo 11). Una vez fijados esos valores, muestra las diferentes configuraciones de las partículas en los niveles de energía compatibles con los valores establecidos, y puede contarse la cantidad de microestados correspondientes a cada configuración. Elegido el número de partículas y la energía total, se observan las configuraciones. El programa brinda icónicamente elementos para determinar la multiplicidad asociada a cada configuración. Los datos, volcados en una tabla, permiten distinguir que la multiplicidad de cada configuración es diferente. Si se aumenta el número de partículas, la preponderancia del valor de multiplicidad de una dada configuración respecto del de las otras es más evidente. Puede interpretarse dicha

configuración como la asociada al macroestado de equilibrio y analizarse a partir de allí las fluctuaciones en el equilibrio.

¿Es el lenguaje utilizado apropiado para describir el fenómeno y /o proceso puesto en juego y la actividad propuesta?

El lenguaje en el applet es básicamente icónico, pudiéndose visualizar esquemáticamente la distribución de partículas para una energía determinada. En la actividad intervienen tanto el lenguaje icónico como el simbólico y verbal, estableciéndose traducciones entre los mismos en varias oportunidades. Tanto los términos utilizados como los símbolos y representaciones son familiares para los estudiantes y han sido utilizados en otras oportunidades.

¿Qué conceptos, propiedades, nociones teóricas se consideran previos y cuáles se espera que emergerán de la utilización del applet?

Son conceptos previos: Macroestado, Microestado, Niveles de energía, multiplicidad, configuraciones. Estos conceptos han sido trabajados en actividades anteriores. Como conceptos emergentes, se espera obtener nociones de equilibrio, asociación de equilibrio con multiplicidad máxima, fluctuaciones en el equilibrio, importancia de considerar un número grande de partículas.

Las nociones que se pretende trabajar con el applet son básicamente: la vinculación del Equilibrio, con el macroestado de máxima multiplicidad y las condiciones bajo las cuales se dan las fluctuaciones en el equilibrio. Ideas principales: En un sistema aislado, todos los microestados se suponen igualmente probables. Pero las configuraciones (modos de ocupación de los niveles discretos establecidos), no tienen igual probabilidad. Esto no es evidente para pocas partículas (donde varias configuraciones pueden tener probabilidades similares) pero, con un número suficientemente grande de partículas, hay una configuración claramente más probable. Dicha configuración (macroestado) corresponde al equilibrio. Como otras configuraciones son posibles, habrá fluctuaciones. Es decir, es posible que el sistema se encuentre por momentos en otros macroestados (de no equilibrio). Sin embargo, la alta probabilidad del macroestado de equilibrio hace que esa situación se de en lapsos muy cortos de tiempo y sea prácticamente imperceptible. A lo sumo podrán apreciarse ligeras variaciones de las variables macroscópicas en valores muy próximos a los del equilibrio (que corresponderán a macroestados con probabilidades altas, aunque menores a la del macroestado de equilibrio).

¿Tienen los alumnos los conocimientos previos necesarios para abordar la actividad? Los significados pretendidos tienen una complejidad abordable, o una dificultad manejable?

Los conceptos previos necesarios para abordar la actividad fueron trabajados en las clases teórico prácticas y además en el contexto mismo de la actividad planteada en el marco de las simulaciones anteriores. Es razonable suponer entonces que los estudiantes puedan abordar la actividad favorablemente. De todas maneras no puede descartarse a priori la posible generación de conflictos semióticos en el desarrollo de la actividad y en la comprensión de la temática abordada. En ese sentido, un análisis de la literatura sobre concepciones alternativas o dificultades de comprensión del concepto estadístico de entropía y los diferentes conceptos asociados es requerido para profundizar el análisis. Dada la relevancia de este aspecto, se lo trata separadamente en el apartado siguiente.

¿Están las definiciones, procedimientos, proposiciones o explicaciones clara y correctamente enunciados, y adaptados al nivel educativo al que se dirigen?

Las definiciones, procedimientos y proposiciones están adaptados al nivel educativo al que se dirigen de modo que se espera que articuladas con las actividades anteriores, emerjan y se afirmen los nuevos conocimientos esperados.

¿En qué argumentación (justificación), se basa el applet?

La argumentación es inductiva a través de la observación concreta de un número de partículas distribuidas en diferentes configuraciones de energía para una energía total constante del sistema. El dispositivo calcula y muestra los resultados de manera gráfica. A partir de situaciones con diferente número total de partículas y de energía total, podrá observarse el comportamiento de la multiplicidad del macroestado más probable (macroestado de equilibrio) y realizar consideraciones acerca de las posibles fluctuaciones en el equilibrio. En la Figura 4.6 se sintetiza la configuración epistémica de referencia asociada al applet denominado Multiplicidad.

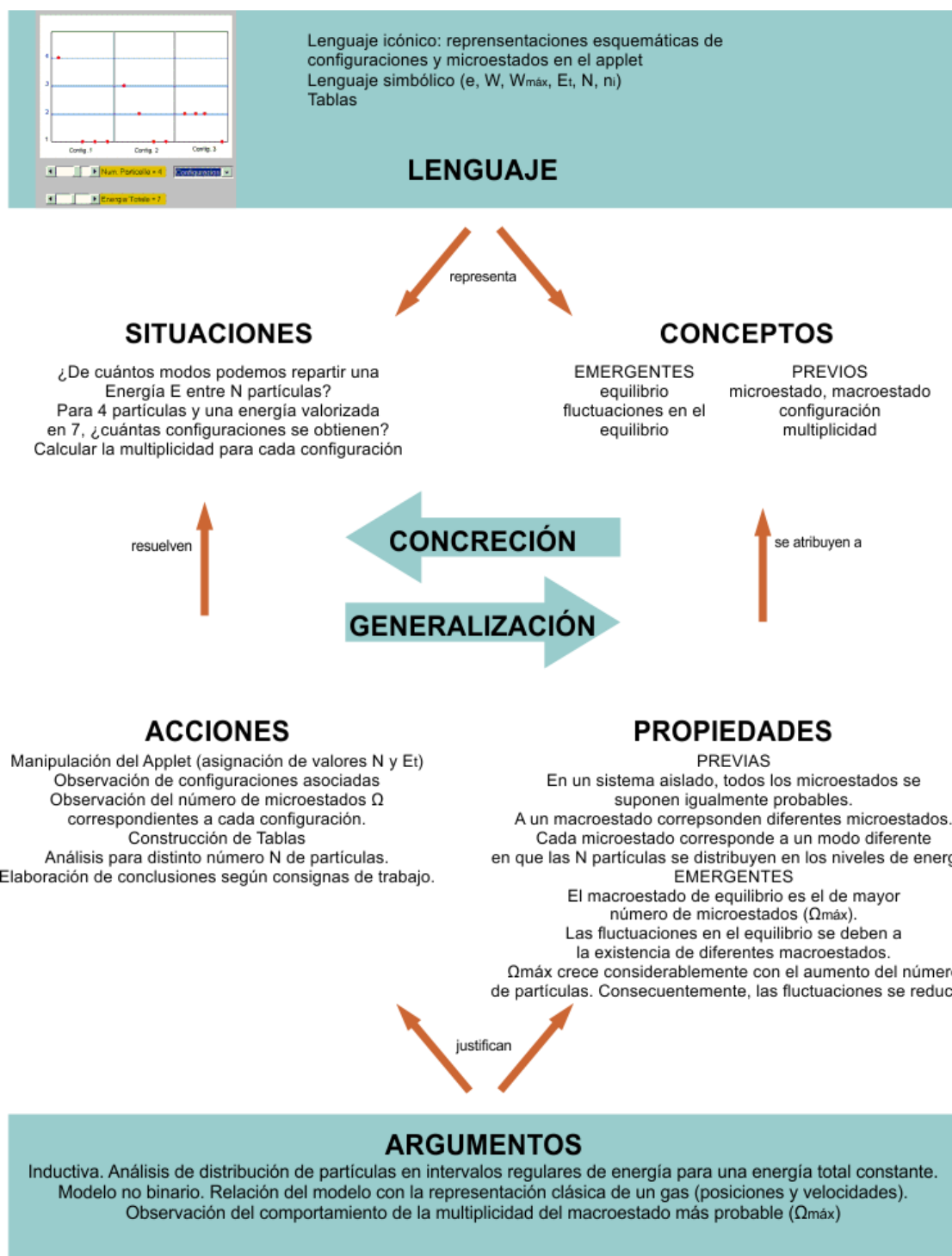


Figura 4.6: Configuración epistémica asociada al applet Multiplicidad

4.4. HIPÓTESIS PRELIMINARES SOBRE LA IDONEIDAD DIDÁCTICA DEL DISPOSITIVO

El análisis a priori realizado sobre cada una de las actividades propuestas en el dispositivo diseñado constituye el marco de referencia para delinear nuestras hipótesis preliminares sobre su idoneidad didáctica.

En lo que respecta a la idoneidad epistémica, consideramos que el dispositivo pone en juego adecuadamente los significados de referencia que se pretende reforzar: los conceptos básicos de frecuencia y probabilidad de sucesos, los conceptos de microestado, macroestado, multiplicidad y entropía y las nociones de equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad.

En relación con la idoneidad cognitiva, suponemos que los estudiantes podrán operar con los applets sin dificultad y realizar las tareas propuestas, y que lograrán, a través de ellas, una adecuada comprensión de las nociones pretendidas.

En lo que atañe a la idoneidad afectiva nuestra hipótesis es que los estudiantes acogerán con interés el trabajo, y se involucrarán activamente en el proceso de estudio planteado.

En lo que se refiere a la idoneidad interaccional, creemos que la modalidad adoptada en la implementación del dispositivo brinda suficientes oportunidades de interacción, sea entre los estudiantes, en el trabajo programado para la realización de las actividades fuera de clase, como con el docente, en las clases de consulta previstas.

En cuanto a la idoneidad mediacional, debemos considerar las características del recurso elegido, la modalidad adoptada y el tiempo asignado a la tarea.

En lo que respecta al recurso, consideramos que una actividad basada en simulaciones es sumamente adecuada para trabajar el tema entropía desde una perspectiva microscópica, ya que posibilitará ensayar en poco tiempo una diversidad de modelos y situaciones, de una manera que no podría lograrse con los recursos tradicionales, tales como experimentos de laboratorio o problemas de lápiz y papel.

En cuanto a la modalidad adoptada, no presencial, consideramos que la misma colaborará con el aprendizaje de los estudiantes, permitiendo que ellos regulen sus tiempos de acuerdo a sus intereses y necesidades.

En cuanto al tiempo asignado a la tarea, una semana, nuestra hipótesis es que el mismo es suficiente para realizar la actividad planteada.

En referencia a la idoneidad ecológica, consideramos que la propuesta, tanto en su contenido como en su forma de implementación, se adaptará bien al curso para el que fue diseñada, ofreciendo oportunidad para reforzar conceptos, sin colisionar con las actividades tradicionales.

Índice

5.1 Análisis a posteriori. Logros y dificultades de los estudiantes.

5.1.1 Urna de Boltzmann.

5.1.2 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el Equilibrio.

5.1.3 Tirada de Monedas.

5.1.4 Multiplicidad.

5.2 Análisis a posteriori. Nociones alternativas de equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad.

5.3 Análisis a posteriori. Idoneidad Didáctica del Dispositivo.

Abordamos en este capítulo el análisis a posteriori de la experiencia, tomando como base las respuestas de los estudiantes a las tareas propuestas (que pueden consultarse en Anexo B), así como sus comentarios acerca de la actividad realizada, recogidos en las consultas y en entrevistas hechas con posterioridad.

La síntesis que aquí presentamos es el resultado de un trabajo cuidadoso y minucioso sobre las respuestas de los estudiantes, en el que procuramos interpretar adecuadamente sus puntos de vista, reconocer sus modos de razonamiento y detectar tanto los logros en sus avances conceptuales, como las dificultades de comprensión que aún persistían.

Organizamos la presentación del análisis a posteriori en tres apartados.

En el apartado 5.1, analizamos por separado cada una de las actividades propuestas, considerando en que medida los estudiantes pudieron abordarlas y hasta qué punto lograron los conocimientos esperados. Organizamos dicho análisis a partir de un cuestionario básico aplicado a cada actividad:

¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?

¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en cada applet?

¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?

¿Lograron la apropiación de los conocimientos pretendidos?

En el apartado 5.2., profundizamos el análisis de las respuestas de los estudiantes en relación con las nociones de equilibrio, irreversibilidad y fluctuaciones.

En el apartado 5.3. nos centramos en el análisis de la idoneidad didáctica del dispositivo, contrastando sobre esa base las hipótesis preliminares, y respondiendo de ese modo las preguntas de investigación tal como fueron formuladas en el capítulo 1.

5.1 ANÁLISIS A POSTERIORI. LOGROS Y DIFICULTADES DE LOS ESTUDIANTES.

5.1.1 Urna de Boltzmann

¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?

Tanto los informes como las entrevistas en general, evidenciaron que los alumnos trabajaron con el applet sin dificultad. Hicieron correr el applet variando los parámetros número de bolitas y número de extracciones y capturaron para cada caso las gráficas de histograma correspondientes. Pudieron realizar además las tareas propuestas, completando las tablas solicitadas y calculando multiplicidades y probabilidades para diferente cantidad de bolitas extraídas.

¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en el applet?

Todos los grupos comprendieron la situación planteada. No hubo dificultad en interpretar las gráficas de frecuencia y de probabilidad y en relacionarlas en cada caso con la situación simulada en la urna

¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?

No se observaron mayores dificultades. Relacionaron adecuadamente la representación icónica de las bolitas extraídas en cada paso y la representación gráfica de frecuencias (histograma). Sus respuestas evidenciaron una lectura correcta del gráfico presentado en el applet, y una distinción adecuada de las dos representaciones presentes en el mismo (frecuencias y probabilidades).

¿Lograron los alumnos la apropiación de los conocimientos pretendidos?

La distinción entre frecuencia y probabilidad y los conceptos de microestados y macroestados fueron comprendidos por la totalidad de los grupos. No hubo dificultad en individualizar el macroestado con mayor número de microestados y por ende el más probable, así como el número total de microestados. En ese sentido, todas las tablas solicitadas fueron completadas correctamente por todos los grupos. El análisis propuesto con el uso de hojas de cálculo y la construcción de los gráficos correspondientes permitieron a los alumnos comprender conceptos que habían sido trabajados de manera muy rápida en las clases.

Lograron reconocer que, para un número muy grande de bolitas extraídas y una gran cantidad de extracciones, la curva de frecuencia prácticamente coincide con la de probabilidad, adoptando la forma de una campana de Gauss.

“Con el aumento del nº de bolitas extraídas la gráfica de probabilidades adopta una curva en forma de campana con un pico en los valores de cantidad de bolitas más probables que se encuentra en el centro”

“Si N es muy grande la curva de probabilidad será de una campana más estrecha y mucho mayor en el macroestado de igual distribución de pelotitas”.

Comprendieron además que la gráfica se hace tanto más aguda cuanto mayor es el número de bolitas extraídas. Asociaron adecuadamente el pico de la curva con el macroestado más probable: el correspondiente a igual cantidad de bolitas rojas y azules.

“En los gráficos de multiplicidad se puede observar que ante el aumento de N , para un mismo macroestado, la multiplicidad aumentó enormemente así como también la cantidad de microestados que posee una relación directa con el incremento de N ”.

“Al aumentar el número de bolitas, observamos una concentración de valores en el número de bolitas medio, es decir aumenta la probabilidad de obtener un número equilibrado de bolitas, tanto rojas como azules”.

“La gráfica tendería a centralizar los valores en su punto medio y también incrementaría la probabilidad de que esto ocurra”.

“Observamos que al aumentar N la probabilidad se va centrando más alrededor del macroestado que más microestados tiene, esto se observa cambiando de N valiendo 20 a 100 y si fuese enormemente grande, el único estado observable sería aquel que mayor microestados tenga ya que las probabilidades de observar otro macroestado serían despreciables”.

De los comentarios de los estudiantes realizados en las consultas y entrevistas surge que no tuvieron, en general, inconvenientes con las ideas trabajadas en la actividad. Sólo uno de los grupos manifestó una dificultad inicial, particularmente relacionada con el reconocimiento de frecuencias y probabilidades, que fue subsanada en las consultas.

5.1.2 Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio

¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?

Los informes pusieron de manifiesto que los alumnos no tuvieron dificultades para trabajar con el applet. Realizaron las actividades propuestas en su totalidad. Trabajaron la simulación con diferente cantidad de partículas según lo solicitado y registraron correctamente las gráficas correspondientes.

¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en el applet?

Los alumnos interpretaron adecuadamente la situación como el comportamiento de bolitas en una caja, en cuanto a su distribución espacial (izquierda – derecha) y asociaron el sistema modelizado a una situación real (en particular un gas). Lograron establecer además algunas relaciones entre el comportamiento del modelo y el de las variables macroscópicas que caracterizarían un gas en el equilibrio.

¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?

En cuanto al lenguaje (términos, expresiones, notaciones o gráficos), en sus diversos registros (escrito, oral, gestual, icónico, entre otros), no se observaron mayores dificultades. Incorporaron y asumieron como tales las diferentes manifestaciones del lenguaje.

Las respuestas de los estudiantes indicaron una adecuada lectura de las representaciones gráficas presentadas en el applet, así como capacidad para relacionarlas. El esquema icónico que representaba el sistema, la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo y el histograma correspondiente, pudieron ser puestos en correspondencia para dar respuesta a las tareas planteadas.

¿Lograron los alumnos la apropiación de los conocimientos pretendidos?

Las actividades planteadas iban introduciendo a los estudiantes al análisis de la noción de equilibrio y el concepto de irreversibilidad desde la perspectiva microscópica. Procuraban relacionar que, en el equilibrio, el valor medio de las magnitudes macroscópicas se mantiene constante aunque dichas magnitudes muestran fluctuaciones en torno a ese valor medio y que las mismas decrecen a medida que se considera mayor cantidad de partículas.

Los niveles de comprensión alcanzados muestran que se logró vincular el macroestado más probable con el equilibrio, y comprender cómo incide el número de partículas en la presencia perceptible de fluctuaciones.

“Si sería que alcanzó el equilibrio. Caracterizaría a éste como el estado en el que las funciones de estado del sistema asumen un valor constante en el tiempo”.

“Caracterizaría el equilibrio como el estado en donde la diferencia de partículas a la izquierda y a la derecha es pequeña en comparación del nº total de partículas en la caja. Es más difícil ver el equilibrio en las situaciones donde participan pocas partículas como por ejemplo en la situación donde hay 2, 4 y también 10 partículas, pero a partir de las 20 ya comienza a verse más claro que el sistema llega a un equilibrio”

En relación al reconocimiento de la posibilidad de fluctuaciones y la asociación del equilibrio con la no variación de variables macroscópicas, hemos observado algunas dificultades. Algunos grupos las interpretan como un fenómeno microscópico; otros grupos no las reconocen, ya que asocian el equilibrio con igual cantidad de partículas de un lado que del otro, de manera absoluta. A pesar de observar que las gráficas de $N_i - N_d$ fluctúan constantemente en el tiempo, hay grupos que sostienen que la diferencia entre el número de partículas a la izquierda y derecha, debe ser cero; otros lo interpretan como valores medios y algunos como intervalo en torno al valor medio.

“La gráfica de la diferencia entre la cantidad de partículas del lado izquierdo y el lado derecho se mantiene oscilando en las cercanías del 0. Las variaciones o fluctuaciones que se observan en las gráficas nos advierten de que lo que consideramos equilibrio, no necesariamente se da con valores exactos, sino que ronda por ciertos valores. El valor medio de la diferencia, 0, permanece constante en el tiempo”.

“El comportamiento cualitativo de la gráfica $N_i - N_d$ en función del tiempo en el equilibrio es cero ya que para todo tiempo la cantidad de partículas del lado izquierdo de la caja va a ser igual al nº de partículas del lado derecho de la misma. Las variaciones o fluctuaciones que se observan en las gráficas anteriores, indican que el sistema no está en equilibrio, es decir, que la cantidad de partículas que se encuentran ubicadas en el sector izquierdo de la caja varían a medida que transcurre el tiempo. El valor medio de $N_i - N_d$ es semejante a 0 y permanece constante”.

Las preguntas finales de la guía preguntaban a los alumnos si las variaciones o fluctuaciones que se dan en el equilibrio pueden ser detectadas por algún instrumento y si esas fluctuaciones están asociadas a cambios en las variables macroscópicas que determinan el sistema. Estas preguntas, que apuntaban a establecer alguna vinculación entre el comportamiento microscópico del sistema modelado y el comportamiento macroscópico del gas, generaron dudas y respuestas diversas.

En lo referente a asociar el comportamiento del número de partículas con alguna variable macroscópica para el caso de un gas, los estudiantes pensaron en un abanico de magnitudes representativas y entre ellas nombraron; presión, temperatura, densidad, volumen y energía cinética. Sin embargo las explicaciones dadas fueron confusas al intentar argumentar el porqué de la elección de esas variables.

En el caso del posible registro de las fluctuaciones a través de un instrumento detector, aparecieron cuestiones también confusas. Por un lado piensan en un instrumento que detecte cantidad de partículas y responden en ese caso la no posibilidad de detectarlas con ningún instrumento. Otros sin embargo, avanzaron en una mejor comprensión destacando que el instrumento mediría valores promedio de la variable macroscópica que caracteriza el sistema.

“No sé qué instrumento podría medir las fluctuaciones pero mientras mayor sea N esta medición sería más difícil, por lo que se necesitaría un instrumento más sensible”.

“Se puede considerar que las variaciones o fluctuaciones son perceptibles y podrían detectarse a través de algún instrumento si es que el nº de partículas que se encuentran en el sistema es relativamente bajo. A medida que se aumenta la cantidad de partículas, las variaciones y/o fluctuaciones se van haciendo más imperceptibles”.

“No existe instrumento que pueda contabilizar la cantidad de partículas con sus respectivas posiciones y velocidades en todo instante de tiempo.

“Cuanto mayor sea la cantidad de moléculas en el recipiente más constante parecerá ser las variables macroscópicas del sistema”.

“Como está relacionado con la temperatura, esta misma es una variable que se puede medir, pero si las fluctuaciones son dentro de un valor cercano al estado de equilibrio, estas variaciones no serán notadas por el instrumento. Si N aumenta el proceso se vuelve más rápido por lo que se alcanzaría un estado de equilibrio de forma rápida”.

“En el caso de que las partículas se trataran como las moléculas de un gas se podría asociar a N_i y a N_d con la variable macroscópica presión. Ésta sería provocada por el choque continuo de todas las moléculas contra las paredes de la caja. Si el sistema se encontrase en equilibrio, la presión se mantendría constante”.

“Podríamos asociarla con la variable macroscópica temperatura en la que aumenta la probabilidad que las moléculas de dicho gas estén en el mismo valor (en promedio) conforme aumente el n° de moléculas. Luego en el equilibrio la temperatura de cada molécula de gas permanecerá constante teóricamente aunque experimentalmente sería aceptable que la diferencia de temperaturas sea relativamente pequeña”.

“ N_i y N_d se puede relacionar con la variable macroscópica densidad (partículas por unidad de volumen). Esta variable no permanece constante en el tiempo ya que los discos se mueven libremente”.

“Dado que N_i y N_d son partículas en movimiento, a ellas se les puede asociar una energía cinética, que está implicada en la temperatura termodinámica”.

En cuanto a la pregunta que indagaba sobre la irreversibilidad o no del fenómeno observado, las respuestas muestran que muchos estudiantes lograron interpretar la irreversibilidad como fenómeno estadístico, asociado a sistemas con gran número de partículas. No obstante, no todos alcanzaron esa comprensión.

“Los procesos son irreversibles ya que una vez que las partículas se han dispersado, es muy poco probable que regresen a su estado inicial. Sí, depende de N , ya que para N pequeños la probabilidad de volver al estado inicial son más altas que para un N mayor”.

“En las experiencias realizadas se ve que puede ser reversible, por ejemplo en el 1er caso, puede darse que estén las 2 partículas en el lado izquierdo, que las 2 estén en el derecho y una en cada lado repitiéndose esas situaciones en el tiempo. Cuando se va aumentando la cantidad de partículas, esto se vuelve menos probable y de esa forma podríamos llegar a decir que con un n° importante de partículas, el proceso es irreversible, tiende a ocupar todo el volumen y no vuelve después a ocupar una mitad”.

“Considerando los casos analizados en la simulación, se puede decir que los procesos observados son irreversibles, sin importar el valor de N utilizados; ya que en la naturaleza, no existe un proceso que sea reversible”.

“Sí, es un proceso irreversible ya que nunca más las partículas volverán a su estado inicial (todas a la izquierda)”.

5.1.3 Tirada de monedas

¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?

Los informes evidenciaron que los estudiantes trabajaron con el applet en general sin dificultades y realizaron la tarea propuesta.

“El de las monedas me encantó. El histograma está bueno. Yo lo dejé como 15 minutos andando y le puse como 20000 monedas. Uno nota un crecimiento abrupto y otro más lento. Aumentando el número de monedas y de flips por paso las fluctuaciones se hacen más constantes. Haciéndolo más y más largo se podían obtener mejores resultados”.

Algunos grupos no dejaron correr la simulación el tiempo suficiente para que el sistema llegue al equilibrio, particularmente en el caso de un sistema con muchas monedas. Esto los llevó a interpretaciones erróneas en cuanto a distinguir diferencias sobre las características del equilibrio en situaciones de pocas y de muchas monedas.

“La principal diferencia que podemos observar es que para el caso de 20 monedas se llega al equilibrio mientras que para 1000 monedas no. Así como también la entropía alcanza su pico variando un poco en torno a ese valor, en cambio en el segundo caso fue creciendo de manera constante”.

Por otra parte, es necesario mencionar que uno de los grupos enfrentó una dificultad en la interpretación de las consignas del applet, sobre cómo variar el número de monedas del sistema, que trajo serias consecuencias para su trabajo posterior. Ocurrió que modificaban el número en el display que indicaba la cantidad de monedas del sistema, sin ejecutar la acción siguiente para que el cambio efectivamente se produjera. Como consecuencia, las gráficas del applet devolvían una y otra vez la misma respuesta, independientemente del número de monedas indicado. Naturalmente, esto afectó significativamente las interpretaciones sobre la tarea planteada.

¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en el applet?

Los alumnos interpretaron adecuadamente el sistema simulado y relacionaron correctamente las diferentes representaciones mostradas en el applet. Particularmente, lograron una buena asociación entre el sistema de monedas y el de partículas en una caja, del applet anterior. Establecieron una analogía entre partículas del lado izquierdo y derecho de la caja con monedas cara o cruz.

“Lo consideramos semejantes por la característica que ambos sistemas alcanzan su equilibrio cuando se equiparan las cantidades en el primer caso se ubicaban uniformemente las partículas de cada lado y en el segundo caso quedaban visibles la misma cantidad de monedas rojas y azules. También notamos que alcanzan su equilibrio de manera más uniforme cuando aumenta el nº de partículas en el primer caso y moneda en el segundo”

“La tirada de monedas y la actividad 2 de las partículas en la caja se asemejan por el análisis en particular que le realizamos: en ambos casos son variables con 2 valores posibles: o es cara o es cruz o está del lado derecho, o está del lado izquierdo. Y en ambos casos arrancaron en una condición inicial particular: todas las partículas se encuentran en el lado izquierdo de la caja o todas son “caras”.

“La semejanza que hay entre las dos simulaciones, ‘tirada de monedas’ con la realizada en la actividad 2, es que a medida que se aumentan la cantidad de partículas, ya sean monedas o moléculas, el sistema va a llegar a un equilibrio que presenta menos fluctuaciones, que otro que posee una menor cantidad de partículas”.

¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?

En cuanto al lenguaje, no se observaron mayores dificultades. Los estudiantes trabajaron con registros semióticos diferentes (lenguaje formal, verbal, icónico, etc.), relacionándolos adecuadamente. Pudieron establecer relaciones entre las diferentes gráficas para analizar y describir el comportamiento del sistema.

¿Lograron los alumnos la apropiación de los conocimientos pretendidos?

Los alumnos profundizaron las características del equilibrio en un sistema análogo al de las partículas en una caja; observaron que cuando aumenta el número de partículas las fluctuaciones son menores y se hacen imperceptibles cuando el número de componentes del sistema es muy grande; visualizaron el comportamiento de la entropía para casos de sistemas con pocas y muchas monedas.

La mayoría de los grupos alcanzó, en la realización de la tarea, los niveles de comprensión y diferenciación conceptual esperados. Sus respuestas mostraron que comprendían la vinculación entre el comportamiento de la entropía para valores grandes y pequeños de N . Pudieron establecer relaciones en el comportamiento de las diferentes gráficas que describen el sistema. Algunas respuestas dadas por los estudiantes las sintetizamos en los párrafos siguientes:

“Las diferencias visibles en las gráficas, suponemos que están dadas a que en un sistema menor, un solo cambio de valor de nuestra variable “cara o cruz” afecta más a la totalidad del sistema que si ese mismo cambio ocurriera en un sistema 50 veces mayor”.

“En las monedas a medida que se aumentaba la cantidad de monedas la entropía tardaba más tiempo en llegar al máximo porque al tener que dar vuelta más monedas como todas empezaban de un solo lado lleva más tiempo esos flips dar vuelta esas monedas y cuando hay pocas monedas a veces no se mantenía constante la cantidad de monedas que están de un lado. Al haber poca cantidad de monedas podía llegar a estar todas de un lado y luego todas del otro. A medida que aumentaba el número de monedas se mantenía constante el número de caras o cruces”.

“Utilizamos la gráfica de entropía para decidir cuándo el sistema está en equilibrio ya que la curva se hace asintótica a un valor de entropía, lo cual nos indica que el sistema se encuentra en los estados más probables por lo tanto en equilibrio”.

En la actividad se proponía a los alumnos que explicaran las diferencias de dos gráficas que representaban la entropía de un sistema de pocas y uno de muchas monedas. Surgieron al respecto, diferentes interpretaciones y explicaciones que mostraban una razonable comprensión de la incidencia del número de partículas del sistema:

“Esta diferencia tiene que ver a que la entropía tiene una relación directa con la multiplicidad del sistema en equilibrio, por lo tanto $S_{20} = 12$ se ve afectada por la fluctuación en torno a $heads = 5$ donde es notoria la diferencia de multiplicidad para valores cercanos como 3 o 7, así como también son su relación de la poca cantidad de monedas involucradas”.

“Las diferencias entre las gráficas son causa de la gran diferencia de monedas que hay entre los sistemas. El sistema con pocas monedas muestra fluctuaciones considerables en relación con la cantidad de monedas total por la escasa cantidad de macroestados disponibles. Lo que no se ve en el sistema de 2000 monedas”.

“En la gráfica del sistema de 20 monedas se llega con mucha más velocidad al valor constante o de equilibrio que en la gráfica del sistema de 2000 monedas. Esto ocurre de la siguiente manera: al inicio todas las monedas están en su cara roja y se van rotando aleatoriamente hacia su cara azul, una por una, hasta llegar a un punto en que las caras sean la mitad roja y la otra mitad azul; después de ese momento el sistema siempre va a tender a lo mismo, esa situación es el equilibrio del sistema. Por lo tanto en ese momento la entropía llega a su valor constante. Mientras menos monedas sean, el sistema llega al equilibrio con menos cantidad de flips. Eso explica porqué la entropía en la gráfica del sistema de 2000 monedas necesita muchos más flips para llegar al valor constante.”

“Otro aspecto a observar es el hecho de que en la gráfica de la entropía del sistema de 20 monedas se presentan más fluctuaciones que en el sistema de 2000. Esto sucede porque en los sistemas con pocas monedas el equilibrio se alcanza y de a momentos las monedas coinciden en caer todas o casi todas con caras del mismo color y el equilibrio se pierde por un instante pero luego se recupera nuevamente. En ese momento en que el equilibrio se pierde se produce la fluctuación en la gráfica de entropía. Por esto en la gráfica de entropía del sistema de 2000 monedas no se presentan prácticamente nada de fluctuaciones”.

Observamos que los grupos adoptaron diferentes criterios para determinar cuándo el sistema había alcanzado el equilibrio:

“El criterio fue observar que la cantidad de caras en las monedas sea aproximadamente igual a la de cruces a lo largo del tiempo”.

“Hemos utilizado el criterio de que el equilibrio se alcanza cuando las fluctuaciones son mínimas”.

“Determinamos que el sistema alcanzó el equilibrio cuando en la gráfica de las monedas observamos que ambas tienden a un valor medio, es decir quedan aproximadas las cantidades de monedas azules y rojas a la vista y además cuando la curva de entropía se hace constante”.

5.1.4 Multiplicidad

¿Qué dificultades evidenciaron los alumnos para realizar la tarea propuesta? ¿Pudieron ejecutar los procedimientos solicitados?

Los alumnos trabajaron con el applet sin dificultad y no tuvieron inconvenientes en completar la tarea planteada. La actividad como tal era sencilla de realizar, ya que, fijados N (número de partículas) y E (energía total), sólo restaba observar la representación en pantalla de las distintas configuraciones posibles y los microestados asociados a ellas. En cuanto a los cálculos solicitados de multiplicidad, observamos que los mismos fueron realizados correctamente, y se completaron las tablas correspondientes.

¿Comprendieron adecuadamente la situación presentada en el applet?

Se observó en algunos grupos una dificultad en cuanto a reconocer a qué tipo de sistema podía corresponder el modelo representado en el applet, particularmente debido a la distribución de las partículas en niveles discretos de energía de intervalos regulares. En general, la idea de los estudiantes correspondió a asociar el sistema modelizado con un gas. Sin embargo, ese caso no responde de manera inmediata a los niveles discretos regulares de energía que se muestran en el applet. No obstante, como explica Sperandeo (2000), ese modelo fue el utilizado por Boltzmann en su artículo de 1872, planteando niveles discretos y proponiendo luego un pasaje al límite cuando ε tiende a cero.

¿Establecieron relaciones adecuadas entre los diferentes lenguajes utilizados?

En cuanto al lenguaje, no se observaron mayores dificultades. Los estudiantes trabajaron con registros semióticos diferentes (lenguaje formal, verbal, icónico, etc.), relacionándolos adecuadamente. Debe mencionarse, no obstante, que algunos grupos mostraron interpretaciones erróneas de la expresión: $E = n_1 \varepsilon + n_2 2\varepsilon + n_3 3\varepsilon + \dots + n_n n\varepsilon$, que en realidad evidenciaban confusiones en cuanto al modelo representado en el applet.

¿Lograron los alumnos la apropiación de los conocimientos pretendidos?

En general los grupos que alcanzaron, en la realización de la tarea los niveles de comprensión y diferenciación conceptual esperados. Sus respuestas, particularmente en lo que se refiere a los temas planteados, mostraron que comprendían la vinculación entre macroestado más

probable y equilibrio así como la incidencia del número de partículas en la percepción o no de las fluctuaciones.

“También vemos (según tablas de valores) que en una misma experiencia (es decir manteniendo constante la E_T y a N) hay macroestados que poseen mayor nº de microestados (Ω) que los demás, teniendo así una mayor probabilidad de aparecer que el resto”.

“Es de esperar, entonces que el sistema evolucione en el tiempo hacia el macroestado correspondiente al de mayor microestados accesibles, es decir el más probable y se estabiliza allí, aunque con posibles fluctuaciones”.

“Una vez alcanzada esta distribución existe casi la certeza de que el sistema permanecerá en ese estado macroscópico, que es enormemente más probable que los otros. Se puede decir entonces que éste es el estado de equilibrio”.

“El número de partículas incide en que si tenemos un número muy pequeño de partículas, podrían observarse cambios macroscópicos en el sistema, en cambio para un gran número de partículas no se observarán cambios en el estado macroscópico”.

“El número de partículas que constituyen el sistema incide de la forma en que si tenemos un número muy chico de partículas se podrán observar cambios macroscópicos, mientras que en un número grande de partículas no se observarán cambios de esta naturaleza”.

“Se producen cambios macroscópicos, ya que al cambiar de macroestado cambian las variables de estado”.

“Si el sistema se prepara inicialmente de modo tal que se encuentra en un macroestado II, y que luego las partículas (por razones internas, como por ejemplo, interacciones entre ellas), pudieran cambiar de nivel, manteniendo el sistema aislado, es decir, sin modificar su energía total; el sistema podría estar entonces en cualquiera de sus microestados accesibles (totalidad de microestados), pasando sucesivamente por cualquiera de ellos. Sin embargo, dado que hay una configuración que es la más probable, el sistema se encontrará la mayor parte del tiempo en alguno de los microestados que corresponden a ese macroestado”.

“Una vez alcanzada esta distribución existe casi la certeza de que el sistema permanecerá en ese estado macroscópico, que es enormemente más probable que los otros. Se puede decir entonces que éste es el estado de equilibrio”.

Hay que considerar, sin embargo, que las respuestas de algunos grupos muestran que subsisten algunas dificultades en cuanto a la diferenciación entre microestado y macroestado. Eso se observa, particularmente, en la respuesta a la última pregunta, donde se interrogaba sobre la posibilidad del sistema de pasar de un microestado a otro en el equilibrio.

“Estando en el equilibrio, el sistema puede cambiar de microestado sin producir ningún efecto o cambio microscópico, ya que los microestados en los que variará pertenecerán al mismo microestado de equilibrio.”

“Cuando el sistema está en equilibrio, no puede pasar de un microestado a otro. Pero si suponemos el caso donde el sistema se encuentra cercano al equilibrio si hay un cambio de microestados y esto provoca un cambio macroscópico.”

5.2 ANÁLISIS A POSTERIORI. NOCIONES ALTERNATIVAS DE EQUILIBRIO, FLUCTUACIONES E IRREVERSIBILIDAD.

Las nociones de equilibrio, irreversibilidad y fluctuaciones son importantes en la medida que colaboran a una mejor comprensión de la noción de entropía. Es por ello que profundizamos

en este apartado el análisis de las respuestas de los estudiantes en relación con esos conceptos.

A pesar de que, en términos generales, se logró un buen nivel de conceptualización, hemos detectado en los estudiantes interpretaciones diferentes de las nociones mencionadas, algunas adecuadas y otras erróneas. De modo general, hemos caracterizado dichas interpretaciones, según describimos sintéticamente a continuación.

a) Equilibrio. Identificamos seis maneras diferentes de caracterizar el equilibrio:

E₁) Estadístico: Asociado a un número muy grande de partículas. $N_i - N_d = 0$

“Estadísticamente los valores fluctúan en torno al equilibrio, el cual es mucho más probable lograrlo aumentando el número de partículas. El sistema está en equilibrio cuando la probabilidad de que estén distribuidas entre el lado derecho e izquierdo sea relativamente grande; esto sucede cuando el número de partículas es grande. Dependiendo del grado de aproximación a utilizar puede considerarse o no en equilibrio”.

E₂) Instantáneo: Instantes en que $N_i = N_d$ o donde se interceptan las gráficas

“El hecho de que el sistema esté en equilibrio implica que la cantidad de partículas en el lado izquierdo se mantenga constante, sin embargo, no puede ser para cualquier n° constante, sino la mitad del total de partículas o, lo que es lo mismo, la misma cantidad que en el lado derecho de manera que la diferencia entre ambas sea cero”.

“Para que un sistema esté en equilibrio yo consideraría que la diferencia $N_i - N_d$ sea cero en un tiempo dado. Desde este punto de vista el estado no ha alcanzado el equilibrio”.

“El equilibrio lo definiría cuando $N_i - N_d$ sea cero.”

E₃) Macroscópico: Invariancia de las Magnitudes macroscópicas: Densidad; Temperatura; Presión, Volumen

“...una vez que el sistema evolucionó, su estado macroscópico (presión, volumen, temperatura), se mantiene constante, con lo cual no se producen efectos macroscópicos. En cambio, hay cambios microscópicos”.

“Si sería que alcanzó el equilibrio. Caracterizaría a éste como el estado en el que las funciones de estado del sistema asumen un valor constante en el tiempo.”

“Si el sistema está en equilibrio el sistema puede cambiar de un microestado a otro pero no produce ningún tipo de cambios macroscópicos en él. Pensando en el análisis hecho de moléculas en una caja podemos observar la relación que esta posee con el n° N de partículas con esta, ya que para bajas cantidades las fluctuaciones son muy significativas y podría ser que se produzcan cambios macroscópicos a raíz de esto.”

“La variable macroscópica que podemos asociar con la distribución de las partículas es la presión. El comportamiento de esta variable en el equilibrio sería constante.”

“Se podría pensar como variable la temperatura, para el equilibrio, ambas mediciones tendrían que ser iguales, aunque podrían variar de valor pero siempre de igual manera en ambas mediciones.”

E₄) Entropía constante: Gráfica de entropía alcanza o tiende a un valor constante. La entropía alcanza un máximo y permanece allí.

“Cuando el sistema evoluciona hacia su macroestado más probable ($\Omega=\Omega_{\text{máx}}$), éste alcanza la entropía máxima (manteniéndose en un valor constante) de manera tal que se llega al equilibrio”.

“El criterio que se utilizó fue observar la gráfica de entropía en donde se ve que después de una cantidad de flips la gráfica es casi constante, o sea el sistema está en equilibrio.”

“Determinamos que el sistema alcanzó el equilibrio cuando ... la curva de entropía se hace constante.”

E₅) Fluctuante: Cantidad de partículas próximas en ambas mitades. La diferencia entre N_i y N_d debe ser pequeña y no necesariamente cero.

“Para el caso de 10 monedas es más difícil observar un equilibrio al respecto de las cantidades en cara y en cruz, las pequeñas variaciones en dichas cantidades, tienen gran incidencia en el total. Por ejemplo, para el caso de las 1000 monedas, tener 501 monedas en cara y 499 en cruz, es casi imperceptible en la gráfica ya que esta diferencia es insignificante comparado con el nº de monedas participantes. Ahora bien, si tenemos 10 monedas y 6 están en cara y 4 en cruz, por más de que sea una pequeña diferencia alrededor del valor medio, la diferencia representa un 20% del total y se nota en la gráfica. Por este motivo es que para sistemas con pocos números de monedas es más difícil observar su equilibrio.”

“Si el sistema se encuentra en el equilibrio puede pasar a cualquiera de los 120 microestados que componen el macroestado. No produce cambios macroscópicos ya que la configuración es la misma. A mayor cantidad de partículas el macroestado más probable contará con un nº muy grande de microestados posibles por lo que pasará más tiempo en equilibrio.”

E₆) Atractor: Tendencia al valor central. Valor medio. Salida del equilibrio. Pérdida momentánea de equilibrio. El valor medio atrae el proceso.

“Parecería haber alcanzado el equilibrio ya que la diferencia $N_i - N_d$ oscila alrededor del cero.”

“En este caso no se pudo utilizar el mismo criterio que en el ítem anterior para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio. Si bien podría ser el mismo, no es preferible ya que la gráfica de entropía presenta muchas fluctuaciones. Es mejor mirar la gráfica de las monedas y considerar que el equilibrio se alcanza en el momento en que se cruzan la línea azul con la roja, ya

que después de ese momento la gráfica es muy irregular pero siempre tiende a volver al mismo valor central.”

“Una vez que el sistema alcanza esta distribución, trata de mantenerse allí, debido a que es la que más cómoda le sienta (estado macroscópico más probable). El sistema está en equilibrio y en caso de pasar a otro macroestado, éste trata de volver al macroestado más probable.”

b) Irreversibilidad. Hemos Identificado cinco maneras diferentes de interpretarla.

I₁) Absoluta: Imposibilidad de volver al estado inicial

“Sí, es un proceso irreversible ya que nunca más las partículas volverán a su estado inicial (todas a la izquierda)”.

I₂) Estadística: Probable. Escasa probabilidad de volver al estado inicial . Depende de la cantidad de microestados

“Es muy poco probable que las partículas vuelvan a su estado inicial ya que la mayor cantidad de microestados está caracterizado por la misma cantidad de partículas de cada lado. La reversibilidad depende de los microestados, es decir depende indirectamente de N”.

I₃) Propiedad natural: Irreversibilidad como característica de la naturaleza

“Considerando los casos analizados en la simulación, se puede decir que los procesos observados son irreversibles, sin importar el valor de N utilizados; ya que en la naturaleza, no existe un proceso que sea reversible.”

I₄) Propiedad de un sistema de gran cantidad de partículas

“En un proceso irreversible no se vuelve al estado inicial con el paso del tiempo, por lo tanto los sistemas analizados con pocos discos no se pueden considerar irreversibles ya que en determinados instantes el sistema vuelve a tener todos los discos concentrados en el lado izquierdo.”

“La irreversibilidad de un proceso tiene que ver con el n° de partículas intervinientes en los procesos analizados en esta simulación vemos que cuando intervienen pocas partículas como el caso 2 o 4 el proceso no podría considerarse irreversible, ya que hay instantes en los que todas las partículas se encuentran de un solo lado de la caja. Pero si sería correcto decir que el proceso es irreversible para los sistemas con 10, 20 , 60 y 90 partículas porque para sistemas con una alta cantidad de partículas se vuelve casi imposible que estas vuelvan a concentrarse todas en un sector.”

I₅) Asociada al discurso construido: Tendencia de las partículas a ocupar todo el recipiente.

“Es irreversible porque las partículas tienden a ocupar todo el recipiente.”

c) Fluctuaciones. Encontramos en este caso cinco maneras diferentes de interpretarlas

F₁) Oscilación amortiguada: Disminuyen a medida que transcurre el tiempo

“ $N_i - N_d$ fluctúa constantemente en el tiempo, llegando a alcanzar valores máximos cuando N es relativamente pequeño ($N \leq 10$) y alejándose su valor cada vez más de los valores máximos a medida que N crece. Mayor es el nº de partículas, $N_i - N_d$ oscila entre números de valor absoluto más pequeños a $N/2$ y $N/2$ (en relación a N). Las variaciones que se observan en la gráfica indican que mientras mayor sea N mucho menores, en relación a N , serán los valores entre los que varíe $N_i - N_d$. El valor medio de $N_i - N_d$ es cero, el cuál va variando mientras pasa el tiempo.”

F₂) Instantánea: Pérdida momentánea del equilibrio

“Después de cada vez que se cruzan las gráficas.”

F₃) Asociada al tiempo transcurrido: El valor medio de $N_i - N_d$ no permanece constante; varía en función del tiempo

“El comportamiento de $N_i - N_d$ en función del tiempo en el equilibrio “debería” permanecer constantemente en el valor cero, no obstante eso es improbable para todo tiempo. Las fluctuaciones indican que las partículas se mueven aleatoriamente e impredeciblemente. El valor medio de $N_i - N_d$ es aproximadamente cero. El cuál no permanece constante, sino que varía en función del tiempo con una amplitud relativa menor conforme aumente el nº de partículas.”

F₄) Rango: Intervalo alrededor de $N_i - N_d = 0$

“Cualitativamente, observamos que en el equilibrio, el estado varía alrededor de un valor medio, que es cero. Las fluctuaciones que aparecen son mínimas variaciones de estado, que tiende a acomodarse nuevamente. El valor medio de $N_i - N_d$ es cero y es constante en el tiempo.”

F₅) Variable macroscópica: No asociada a cambios característicos en alguna variable de estado

“ $N_i - N_d$ es la diferencia de moléculas en el lado izquierdo y derecho del recipiente. Cuando la gráfica se encuentra encima del cero quiere decir que en el lado izquierdo hay más moléculas, cuando la diferencia $N_i - N_d$ es cero quiere decir que el sistema está en equilibrio. Las variaciones que figuran en la gráfica indican la cantidad de bolitas que pertenecen al lado izquierdo como al lado derecho. El

valor medio de $N_i - N_d$ es cero. El valor medio varía con el tiempo, o sea, tiene fluctuaciones.”

5.3. ANÁLISIS A POSTERIORI. IDONEIDAD DIDÁCTICA DEL DISPOSITIVO

Discutimos a continuación, y como cierre del análisis a posteriori del dispositivo implementado, su idoneidad didáctica, considerando cada uno de los criterios propuestos por Godino y su equipo.

Idoneidad epistémica:

¿Qué grado de idoneidad epistémica puede atribuirse a la experiencia, es decir, qué-grado de representatividad poseen los significados implementados respecto del significado epistémico de referencia local y general?

La episteme atribuible a la experiencia está asociada a la interpretación estadística de la entropía desde la perspectiva de Boltzmann. Los conceptos y significados relevantes que se pusieron en juego fueron: Probabilidad, frecuencia, multiplicidad, microestado, macroestado, irreversibilidad, equilibrio y fluctuaciones.

En la primera actividad (Urna de Boltzmann), se agudiza la capacidad de lectura de histogramas y la distinción entre frecuencia y probabilidad. Posibilita además, la puesta en escena de los conceptos de microestado y macroestado.

La modificación de parámetros y condiciones iniciales del problema planteado en la simulación, propende a la observación concreta de situaciones donde se varían el número de bolitas y el número de extracciones y se extrapola la situación a valores que no están permitidos por el applet. Esto admite analizar las gráficas de probabilidad y frecuencia, así como visualizar la agudeza de la curva de distribución normal.

La actividad conduce al cálculo de la multiplicidad asociada a cada macroestado y propone además generalizar dicho cálculo para un número N genérico de partículas agrupadas en n grupos distintos formados sobre la base de n propiedades distintas (en este caso el color), valor de la energía, etc.

Las cuestiones planteadas apuntaron a destacar y poner de manifiesto las siguientes ideas:

- La gráfica de frecuencias se aproxima a la de probabilidad al aumentar el número de extracciones.
- Cuando el número de componentes del sistema aumenta, la curva de probabilidad se hace más aguda.
- El macroestado más probable es el que está conformado por el mayor número de microestados.
- La multiplicidad de un macroestado es el número de microestados asociados a él.
- La multiplicidad de un sistema binario se calcula a través de la siguiente expresión:

$$\Omega = N! / (n_1! n_2!) = N! / n_1! (N - n_1)! = N! / n_1! n_2!$$

- La multiplicidad de un sistema para N partículas de propiedades distintas (por ejemplo de varios colores diferentes), es decir n grupos distintos $(n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$ formados sobre la base de n valores distintos de una determinada propiedad (color, valor de la energía, dimensiones,.....), es:

$$\Omega = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$$

- La curva de probabilidad de un sistema binario es una gaussiana.

La segunda actividad (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio), reforzó las nociones de frecuencia, probabilidad, macroestado, microestado y multiplicidad en el contexto de un fenómeno de difusión. Posibilita inferir que las magnitudes macroscópicas que caracterizan un sistema termodinámico (presión, temperatura, densidad, volumen, etc.) puedan interpretarse en función de los microestados, es decir, son manifestaciones de la estructura microscópica del sistema.

Es una actividad que permite trabajar la noción de equilibrio e interpretarla en términos de macroestados. En ese sentido conduce a observar que cuando el sistema alcanza el estado de equilibrio, la cantidad de partículas que se encuentran en la mitad derecha del recipiente no es necesariamente igual a la cantidad de partículas que se encuentran en la mitad izquierda del recipiente. La diferencia se hace notoria cuando el número de partículas intervinientes es muy bajo, situación en que se perciben notables fluctuaciones. La actividad es además útil para interpretar a nivel microscópico, la noción de irreversibilidad de los procesos, destacando su carácter probabilístico.

Las cuestiones planteadas, apuntaron a destacar y poner de manifiesto las siguientes ideas:

- El macroestado más probable (de mayor multiplicidad) se denomina macroestado de equilibrio.
- Si se aumenta el número de partículas, la probabilidad de que el sistema se encuentre en un macroestado distinto al macroestado de equilibrio disminuye.
- El sistema puede efectuar transiciones de un macroestado a otro, pero la mayor parte del tiempo se encuentra en el macroestado de equilibrio o en macroestados próximos a él.
- El cambio de un macroestado a otro determina las fluctuaciones.
- Cuanto mayor es el número de partículas menos notoria es la presencia de fluctuaciones.
- En el equilibrio, el valor medio de las variables termodinámicas macroscópicas de un sistema permanece constante.
- Las fluctuaciones de dichas variables en un sistema real son prácticamente imperceptibles. Esto se debe a que el sistema está constituido por un número muy grande de partículas.
- La irreversibilidad de un proceso es en realidad un fenómeno estadístico asociado a la poca probabilidad de que el sistema vuelva al estado inicial. Dicha probabilidad es tanto más baja cuanto mayor es el número de partículas.
- Las propiedades macroscópicas como la presión y la temperatura están determinadas por el macroestado del sistema. Los microestados correspondientes a un mismo macroestado son indistinguibles experimentalmente unos de otros.

En la tercera actividad (Tirada de Monedas), no solo se refuerzan los conceptos anteriormente estudiados sino que se relacionan esos conceptos con la noción de entropía. Esta actividad permite la puesta en relación de diferentes aspectos, a través de múltiples representaciones simultáneas: representación icónica de las monedas; histograma de frecuencia; gráfico de la entropía como función del logaritmo de la multiplicidad; gráfica del número de caras y cruces en función del número de flips.

El manejo y observación de las múltiples representaciones trae aparejado la posibilidad de profundizar las características del equilibrio observando el comportamiento del sistema para cantidades grandes y pequeñas de elementos. Eso permite analizar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con el aumento del número de elementos.

También permite estudiar la variación de entropía en función del tiempo y su comportamiento para un variado número de elementos.

En definitiva la actividad retoma, en un contexto diferente, las cuestiones centrales ya mencionadas en la actividad 2, e introduce las siguientes ideas:

- La entropía de un sistema aislado alcanza un valor máximo y se mantiene en torno a ese valor con pequeñas fluctuaciones prácticamente imperceptibles si el número de partículas del sistema es muy grande.
- La entropía de un sistema con un número pequeño de componentes muestra notorias fluctuaciones.

La cuarta actividad (Multiplicidad) retoma ideas trabajadas en las anteriores actividades, en un contexto que presenta un mayor nivel de abstracción: la distribución de N partículas en niveles discretos de energía para un valor de energía constante. En dicho contexto se trabaja el cálculo de la multiplicidad para cada configuración; se comprueba el postulado básico de la mecánica estadística; se asocia el macroestado de equilibrio con el de mayor número de microestados, y por ende de máxima multiplicidad; se analiza el paso del sistema de un macroestado a otro y la interpretación de las fluctuaciones en el equilibrio a partir de las probabilidades de los diferentes macroestados.

Además de las ideas clave destacadas anteriormente, las cuestiones planteadas en esta actividad, ponen de manifiesto las siguientes ideas:

- Un sistema puede pasar de un microestado a otro sin que se produzcan cambios macroscópicos. Esto ocurre en las transiciones entre microestados correspondientes a un mismo macroestado.
- Cuando el sistema realiza una transición entre dos microestados correspondientes a diferentes macroestados, se produce un cambio macroscópico (fluctuación) que es imperceptible si el nivel de componentes del sistema es muy grande.

La importancia epistémica del modelo presentado en la actividad 4 es que en él los microestados se relacionan con valores de energía, a diferencia de la actividad 2, en la que se asociaban exclusivamente a posiciones. Es interesante mencionar que la distribución de partículas presentada en el applet, con niveles a intervalos regulares, no responde estrictamente a un modelo cuántico, sino que es una primera aproximación para discretizar la energía desde un modelo clásico, donde las partículas podrían tomar cualquier valor, en un continuo. La actividad no discute, sin embargo suficientemente, el modelo utilizado.

Por otra parte, a diferencia de los casos explorados con la urna, las monedas y las partículas en una caja, que responden todos a un modelo binario (rojo-azul, cara-cruz, izquierda-derecha), éste es el único modelo que considera una distribución no binaria. Tampoco este aspecto es suficientemente destacado en la actividad. La expresión correspondiente a la multiplicidad para un caso como éste ($\Omega = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$), que se menciona en la actividad 1, no se retoma, desaprovechándose la oportunidad de discutir mejor el modelo. Se podría, por ejemplo avanzar un poco más a partir de dicha expresión buscando el máximo de la misma, o mejor de su logaritmo, para determinar el macroestado de equilibrio, y con ello, obtener la distribución de Maxwell-Boltzmann.

Habiendo detallado hasta aquí los significados de referencia puestos en juego en cada una de las actividades, podemos observar que todas ellas están centradas principalmente en comprender y reforzar en diferentes contextos las nociones clave de microestados, macroestados y multiplicidad y su relación con las nociones de equilibrio e irreversibilidad. Esos significados son relevantes y se corresponden fuertemente con los significados de referencia institucional y local.

Idoneidad cognitiva

¿En qué medida los significados puestos en juego en la experiencia, resultaron significativos para los estudiantes y contribuyeron a incorporar los significados de referencia?

Hacer una valoración de la idoneidad cognitiva implica analizar los logros y dificultades conceptuales y procedimentales de los estudiantes en función de la actividad desarrollada. El análisis llevado a cabo en los capítulos anteriores muestra que en general los estudiantes alcanzaron los objetivos que nos propusimos.

En cuanto a las nociones de probabilidad, podemos decir que todos los grupos comprendieron las gráficas de probabilidad y frecuencia. Solo un grupo manifestó algunas dificultades iniciales, aunque pudo finalmente alcanzar un buen nivel de comprensión.

Todos los estudiantes sin excepción lograron una buena distinción entre multiplicidad, macroestado y microestado. Comprendieron la incidencia fundamental del número de elementos intervinientes en la forma que adopta la curva de frecuencia, que se hace tanto más aguda cuanto mayor es el número de componentes del sistema. Pudieron comprobar que la curva de frecuencia se aproxima a de probabilidad (gaussiana) para un número muy grande sucesos.

Lograron comprender que la aparición de pocos elementos en los extremos y un aumento paulatino de los macroestados en la franja central es consecuencia del aumento del número de partículas. Establecieron en función de ello, que aumenta la probabilidad de obtener un número equilibrado de bolitas, tanto rojas como azules; o de igual número de partículas tanto a la izquierda como a la derecha; o de igual cantidad de monedas cara y cruz cuando aumenta el número de elementos del sistema.

Se observa en las respuestas de los estudiantes, que tuvieron en cuenta el número de elementos constituyentes de un sistema macroscópico al momento de caracterizar la situación de equilibrio, las fluctuaciones asociadas y la irreversibilidad de los procesos.

En relación con la entropía, los estudiantes lograron, en general reconocer, en la actividad 3, que la entropía de un sistema aislado llega a un máximo y se mantiene en él con fluctuaciones pequeñas o inapreciables, cuando el número de elementos intervinientes es muy elevado. La apreciación de fluctuaciones importantes fue adecuadamente asociada a la participación de un número pequeño de componentes del sistema.

En lo referente a las nociones de equilibrio, fluctuaciones e irreversibilidad, hemos notado, no obstante, interpretaciones o puntos de vista variados o alternativos, según analizamos en el apartado 5.2.

Otro aspecto, abordado principalmente en las preguntas finales de la actividad 2 es el referido a establecer vinculaciones entre las características macroscópicas y microscópicas del sistema. Se pretendía que los estudiantes interpretaran que las variaciones del parámetro N_l - N_d (número de partículas a la izquierda y a la derecha) puede asociarse, a nivel macroscópico con fluctuaciones de la magnitud densidad. Se procuraba también que lograran comprender que, en el equilibrio, el valor medio de dicha magnitud permanece constante y que las fluctuaciones son prácticamente imperceptibles para un sistema real, al gran número de partículas involucradas. Al respecto, si bien algunos estudiantes lograron relacionar N_l y N_d con la densidad, observamos una variedad de respuestas, incluyendo presión, temperatura o energía cinética, sin advertir que en estas magnitudes influye fundamentalmente la distribución de velocidades.

Idoneidad afectiva

¿Cuál es el grado de implicancia de los estudiantes durante el proceso de estudio?

Entre los componentes e indicadores de idoneidad afectiva resaltamos la puesta en evidencia a partir de lo manifestado por los estudiantes del interés por la tarea realizada. El grado de implicación de los estudiantes superó nuestras expectativas, según hemos constatado en las entrevistas, en las consultas y en el trabajo desarrollado.

La alta motivación por la tarea se pone en evidencia en comentarios de los estudiantes, como los que transcribimos a continuación:

“Te ayuda a cerrar más entre teoría y práctica el práctico de monedas, en general el conjunto de todas las actividades me ayudó. Incluso el primero el de la urna para comprender frecuencia y probabilidad, microestados y macroestados”.

“Háganlo el trabajo para los otros cursos. Está muy bueno.”

“La informalidad del trabajo está buena. Nos sirvió mucho lo de clases y terminamos de entender con las simulaciones.”

Estas observaciones están en concordancia con lo señalado por muchos autores, respecto del interés que genera en los estudiantes el trabajo con simulaciones interactivas.

Idoneidad interaccional

¿En qué medida los modos de interacción docente-discente permiten identificar y resolver conflictos de significado, favorecen la autonomía en el aprendizaje y el desarrollo de competencias comunicativas?

La modalidad adoptada para el desarrollo de la actividad ha favorecido la interacción entre los estudiantes y el aprendizaje autónomo. Consideramos que el hecho de que la propuesta implicaba momentos en que los estudiantes debían trabajar sin la asistencia directa del docente, asumiendo la responsabilidad de su aprendizaje, es un aspecto muy positivo.

Los estudiantes han valorado la modalidad que les permitía trabajar de manera independiente, recurriendo a diferentes fuentes de información en la medida que lo consideraron necesario. Así, algunos grupos refirieron que buscaron en internet o en biblioteca bibliografía sobre el tema, y muchos recurrieron a los horarios de consulta ofrecidos.

“Lo que [está] bueno es que... se haga en grupo porque el debate te ayuda un montón y se aprende un montón y el otro pibe era un sabiondo y nos salía con cada cosa. Nos sirvió un montón. Absorbimos todo lo que él sabía pero que nos servía a nosotros. Por ahí estaría bueno que eso se hiciera en clase entonces ya están todos reunidos en clase. No tenés que juntarte en otro momento, como hicimos los otros laboratorios.”

“Vinimos a todas las consultas para poder avanzar en la resolución de las actividades.”

Una cuestión para analizar en lo que se refiere a la idoneidad interaccional del dispositivo, es que la interacción docente-discente estuvo limitada a momentos de consulta presencial. No se previó, por ejemplo el uso de redes sociales para interactuar con los alumnos.

Por otra parte, tampoco se consideró la incorporación de una instancia final de síntesis en gran grupo que hubiera permitido, en una puesta en común, destacar las ideas emergentes, reforzar conceptos relevantes y superar dificultades conceptuales.

Podría haberse implementado tal vez un foro de discusión para poner en juego las reflexiones finales.

Estas observaciones son importantes para tener en cuenta en futuras intervenciones didácticas.

Idoneidad mediacional

¿En qué medida los recursos materiales, condiciones de aula y tiempo son adecuados para el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje pretendido?

El grado de disponibilidad y adecuación de los recursos materiales y temporales para el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje fue adecuado en la medida que sirvió para los fines propuestos.

Una cuestión a tener en cuenta en lo que se refiere a la idoneidad mediacional del dispositivo, es la modalidad de trabajo no presencial adoptada para su realización. Surge de los comentarios de los estudiantes, que dicha modalidad fue considerada positivamente, sobre todo porque permitió a los grupos regular sus propios tiempos de trabajo. En ese sentido, esta alternativa ha resultado más adecuada que una presencial, realizada en un laboratorio de informática. Si se hubiera implementado como un trabajo práctico tradicional, todos los grupos deberían haberlo realizado al mismo tiempo, y en un lapso de entre dos o tres horas. Hemos constatado que, al brindarles la libertad de trabajar de manera independiente, los estudiantes dedicaron más tiempo a la tarea por el interés que la misma les generó.

Por otra parte, es necesario considerar que la disponibilidad de las salas de informática en la Institución es complicada. La reserva debe hacerse con suficiente anticipación y, aún así, no siempre se puede disponer de una sala en el horario normal de clases.

El tiempo estimado para hacer el trabajo y entregarlo en tiempo fue de una semana. Todos los grupos entregaron lo pedido cumpliendo estrictamente con la consigna dada. Hubo que tener en cuenta que el trabajo lo tuvieron que hacer sobre el final del cuatrimestre y quizás hubiese sido preferible que trabajasen más tiempo con las simulaciones y el tiempo para reflexionar sobre lo hecho hubiese permitido explorar y profundizar más sobre el tema.

Si bien todos los estudiantes trabajaron con entusiasmo y cumplieron con la tarea, algunos plantearon que el trabajo práctico era demasiado extenso y propusieron que algunas actividades podrían integrarse a las clases teóricas.

“Por ahí estaría bueno que la primera parte por ejemplo que la simulación de la Urna se diera demostrativo simultáneamente en clases y todos verían como se hace el TP y entonces el trabajo práctico sea solamente el de las monedas y el de multiplicidad.”

“Proponemos que los dos primeros se den como ejemplos en clases y el TP se reduzca a los dos últimos. No va a ser tan largo. El ejemplo de irreversibilidad está bueno porque se repite lo de las clases. El día de laboratorio que toca, en las compu se cargan los programas y nadie tiene excusa. Nosotros lo hicimos ahí en la compu del Centro de estudiantes. No bastó con la dirección de la página.”

Un tema aparte es la utilización del recurso computacional, en particular, el uso de applets. El hecho de basar la actividad en el trabajo sobre simulaciones resultó muy adecuado, porque permitió ensayar diferentes modelos en múltiples situaciones, pudiendo variar parámetros relevantes y observar cambios significativos en el sistema analizado. Por ejemplo, ha sido de gran importancia la posibilidad, en cada uno de los modelos analizados, de comparar situaciones con un número grande y pequeño de componentes.

Idoneidad ecológica

¿En qué medida la acción definida resultó adecuada para una mejor comprensión del concepto de entropía, en el contexto en que fue implementada?

El plan de acción formativo complementó el entorno tradicional del desarrollo de la clase, articuló las actividades sin colisionar con la organización tradicional. La modalidad adoptada y

el dispositivo implementado aportaron innovación basada en la investigación y la práctica reflexiva, integrando las nuevas tecnologías.

El dispositivo se constituyó como un espacio particular para la construcción conceptual de la noción de entropía y conceptos relacionados, totalmente articulado con el resto de las actividades teórico prácticas implementadas sobre el tema. Las situaciones-problemas tratadas, así como los conceptos, cálculos, operaciones y el lenguaje utilizados, se corresponden adecuadamente con los utilizados por los docentes en sus clases.

En ese sentido, la actividad propuesta puede considerarse un complemento adecuado, que no colisionó con el resto de las actividades tradicionalmente programadas sino que, por el contrario, contribuyó a ampliarlas y reforzarlas.

A MODO DE SÍNTESIS

En esta Tesis hemos abordado el análisis de las dificultades de comprensión de estudiantes universitarios en relación al concepto de entropía y analizado la potencialidad de la utilización de simulaciones como alternativa didáctica para lograr aprendizajes significativos.

Este proyecto se enmarca en los trabajos que articulan enfoques de investigación centrados en desarrollar contextos innovadores en la enseñanza de la física y pretendimos investigar si las simulaciones ayudan a comprender el concepto de entropía desde el punto de vista microscópico.

Hemos diseñado un dispositivo didáctico basado en simulaciones que, según el análisis realizado puede considerarse eficaz para favorecer y para profundizar el proceso de modelización y la construcción conceptual de la entropía y nociones relacionadas desde la perspectiva microscópica. El análisis indica que los modelos y situaciones exploradas en los applets seleccionados constituyen un escenario interesante para ayudar a los estudiantes a desarrollar las ideas centrales del enfoque.

En general, los estudiantes valoraron el dispositivo didáctico y la modalidad adoptada para su implementación. Sin embargo, según hemos visto, hay aspectos que deberían considerarse para optimizar la propuesta.

En primer lugar, en cuanto a la modalidad adoptada para implementar el trabajo práctico, si bien la alternativa del trabajo independiente por parte de los estudiantes se mostró efectiva, se sugiere, en una futura implementación incrementar la interacción entre el docente y los alumnos durante el proceso, incorporando otras modalidades, además de las clases de consulta que se previeron en la experiencia. Por ejemplo, se puede establecer un foro virtual de discusión, que permita a los alumnos plantear sus dudas mientras realizan la actividad y discutir las con el conjunto de sus compañeros y con el docente. Eso permitiría al profesor detectar dificultades comunes a medida que surgen, y hacer, en base a ellas, las observaciones necesarias para ayudar a su superación.

También, atendiendo a la persistencia observada en algunos grupos de algunas interpretaciones erróneas y concepciones alternativas, se sugiere realizar, una vez completada la tarea y presentados los informes, una clase presencial de síntesis para una puesta en común. La discusión en gran grupo brindaría al docente oportunidad para destacar los aspectos relevantes y contrastar interpretaciones.

En lo que respecta a la actividad planteada, consideramos que se pueden mantener las cuatro simulaciones propuestas, con algunos cambios en la Guía de Actividades. Particularmente, la Actividad 4 debería ser reformulada para explicitar mejor el modelo de distribución de energía utilizado y para destacar el hecho de tratarse de una distribución no binaria.

Tomando en cuenta estas consideraciones, hemos realizado una reformulación preliminar del dispositivo (ver Anexo C), que requerirá sin duda de una nueva implementación para un ajuste definitivo. Sin embargo, eso quedará para investigaciones futuras y por el momento daremos por concluida nuestra tarea.

Nos parece importante en esta etapa del trabajo hacer algunas reflexiones sobre el marco teórico metodológico utilizado para llevarlo a cabo. El enfoque ontosemiótico como marco teórico permitió abordar la entropía como “objeto” de conocimiento y su significado desde una perspectiva sistémica y pragmática, que incorpora aspectos correspondientes tanto al

logos (conceptos-definiciones, proposiciones, argumentaciones) como a la praxis (situaciones-problemas y acciones). Este abordaje fue de gran utilidad para encarar varios de los análisis realizados a lo largo del trabajo, particularmente en lo que se refiere al análisis del significado institucional.

En cuanto al diseño metodológico, consideramos que la metodología propuesta por la ingeniería didáctica nos proporcionó elementos adecuados para conducir tanto el proceso de diseño como de experimentación y evaluación del dispositivo, constituyéndose en una metodología interesante para llevar a cabo este tipo de investigación.

El análisis preliminar fue fundamental para establecer las bases en cuanto al diseño del dispositivo. Por su parte, el análisis a priori permitió construir hipótesis sobre la idoneidad didáctica del dispositivo, que fueron luego confrontadas con los resultados del análisis a posteriori.

La noción de idoneidad didáctica desarrollada por Godino, Bencomo, Font, Wilhelmi (2006), fue relevante para estos análisis. La descomposición de la noción de idoneidad en diferentes facetas nos permitió llevar adelante un análisis exhaustivo de la experiencia implementada y obtener criterios concretos para una futura optimización.

A MODO DE CONCLUSIÓN

Hasta el momento, he escrito en primera persona del plural, en el sentido de entender este trabajo como una construcción realizada permanentemente en colaboración con mi directora de Tesis. Sin embargo, para finalizar, me gustaría agregar algunas cuestiones personales relacionadas con mis vivencias y percepciones acerca del trabajo realizado.

Siento como docente una gran satisfacción al haber explorado con gran detalle una de las perspectivas de enseñanza de la entropía, como lo es el enfoque microscópico. Particularmente me permitió ampliar mis conocimientos sobre el tema aunque resta profundizar mucho más. A medida que fui creciendo en la capacidad de comprensión del tema, se abrieron varios caminos que me motivan para continuar con el potencial enriquecimiento que me generó dicho enfoque.

Me gratificó mucho el hecho de haber trabajado con simulaciones, de las cuales desconfiaba al principio del trabajo, en cuanto al papel epistémico y didáctico que las mismas podrían cumplir. A poco de avanzar con la propuesta didáctica, dejé de lado la mirada ingenua que tenía sobre el uso de las mismas, para empezar a comprender cuán importante sería esa herramienta si lograba darles un papel relevante en la enseñanza.

Con dificultades y mucho trabajo encontré respuestas en cuanto a su adecuada utilización en el momento en que dejé de atribuirles el significado otorgado por los desarrolladores y comencé a vislumbrar que, si cada simulación está acompañada de una buena guía que permita reflexionar crítica y conceptualmente a medida que se las utiliza, los estudiantes las incorporan significativa e integralmente como una alternativa importante con la que es posible construir significados. Se convirtió así en una herramienta poderosa, y fue relevante descubrir la potencialidad que le otorgó al recurso la guía que la complementaba.

Confío en que este trabajo servirá como referencia a otros docentes investigadores que quieran llevar adelante una experiencia similar, o incluso utilizar en sus clases el recurso aquí diseñado, no como duplicado fidedigno de la actividad planteada, sino como alternativa elaborada y encuadrada en el contexto que corresponda.

Soy consciente de la enorme responsabilidad que los docentes enfrentan en su accionar diario cuando tienen que preparar las actividades áulicas. Aunque, y casi siempre, algunos queramos llevar a cabo trabajos de este tipo; nos encontramos con la dificultad de no disponer de tiempo suficiente para la preparación minuciosa de una actividad como la descripta. Aún teniendo el

tiempo y las condiciones para poder hacerlo, hay que considerar que el prototipo ensayado va requiriendo de ajustes que serán necesarios hacer. En definitiva, realizar la actividad demanda un esfuerzo enorme, pero vale la pena intentarlo.

Esta investigación no fue fácil y llevó mucho tiempo desarrollarla hasta llegar a su fin. No puedo dejar de mencionar que este trabajo fue hecho al mismo tiempo en que desarrollaba mis actividades laborales, por lo que los momentos de reflexión y toma de decisiones sobre los pasos a seguir se vieron alterados durante días, semanas y algunas veces por meses en los que tenía que dedicarle tiempo a otras actividades, dejando ésta de lado.

Todo es posible, pero el esfuerzo que he hecho y que seguro también han hecho y hacen otros colegas en un contexto en que el docente no dispone del lugar y tiempo suficiente y que no favorece la investigación, es difícil de llevar adelante. Cuando digo contexto que no favorece, me refiero sobre todo al tiempo real de dedicación a la investigación. En mi caso, tuve por suerte el contexto de contención brindado por colegas y el permanente contacto con la Universidad donde se forma el conocimiento, que me obligó continuamente a interrogarme sobre los aspectos fundamentales de la investigación y que hicieron que la motivación, que por momentos decaía, la recuperara a las horas o días, para alimentar mis ansias de formación continua y mis deseos de tratar de desarrollar la labor diaria cada día mejor.

- ANDALORO, G.; DONZELLI, V.; SPERANDEO-MINEO, R. (1991) Modelling in Physics teaching: the role of computer simulation. *International Journal of Science Education*, 13 (3), 243-254.
- ARTIGUE, M. (1990) Epistemología y Didáctica. *Reserches en didactique des Mathématiques*. VOL .10, Nº 23.
- ARTIGUE, M.; DOUADY, R.; MORENO, L.; GÓMEZ, P. (eds.) (1995) *Ingeniería didáctica en educación matemática, una empresa docente*. Méjico: Grupo Editorial Iberoamérica. pp. 33-59.
- ARTIGUE, M. (1989) Ingenierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9 (3), 281-308.
- ARTIGUE, M. (1998) L'évolution des problématiques en didactique de l'analyse. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 18.2, 231-261.
- ARTIGUE, M. (2011) L'ingénierie didactique: un essai de synthèse. En C. Margolinas, M. Abboud-Blanchard, L. Bueno-Ravel, N. Douek, A. Fluckiger, P. Gibel, F. Vandebrouck & F. Wozniak (Eds.), *En amont et en aval des ingénieries didactiques* (pp. 225-237). Grenoble: La pensée sauvage.
- AYYILDIZ, Y.; TARHAN, L. (2012) The effective concepts on students' understanding of chemical reactions and energy. *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi (H. U. Journal of Education)* 42: 72-83.
- BARBERÁ, O.; SANJOSÉ, V. (1990) Juegos de simulación por ordenador: un útil para la enseñanza a todos los niveles. *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (1), 46-51.
- BASSALO, J. (1999) Paradojas de la Física. Parte I. *ContactoS* 33, pp. 22-27| Méjico.
- BEAUFILS, D.; (2000a) Des logiciels de simulation pour modéliser et experimenter sur modèle: quels enjeux pour les apprentisages?, *Actes du premier séminaire national TICE et Sciences Physiques*, Bourdeaux.
- BEAUFILS, D. (2000b) Les logiciels de simulation comme supports de registres de representation pour les apprentissages en physique, *Journées Internationales d'Orsay sur les Sciences Cognitives*.
- BEAUFILS, D. (2001) Utilisation de logiciels de simulation comme aide à la consolidation des connaissances en physique, *informe de estudio* (septiembre de 1998-diciembre de 2000). <http://formation.etud.u-psud.fr/didasco/RapSimlufm/Accueil.htm>.
- BEAUFILS, D. (2009) Le phénoménographe et son modèle, *Revue Aster*, INRP, nº48, 15-38.
- BEN NAIM, A. (2011) *La entropía desvelada*. Tusquets Editores.
- BREWE, E. (2008) Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics. *American Journal of Physics*. December 2008. Volumen 76. Issue 12. pp: 1155-1160.
- BROSSEAU, C.; VIARD, J. (1992) Quelques réflexions sur le concept d'entropie issues d'un enseignement de thermodynamique. *Enseñanza de las ciencias*, 10 (1), 13-16.
- BROWN, A. L. (1992), Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of the Learning Sciences*, 2 , 141-178.

- BUCY, B.; THOMPSON, J.; MOUNTCASTLE, D. (2006) What is Entropy? Advanced Undergraduate Performance Comparing Ideal Gas Processes. En P. Heron, L. McCullough y J. Marx eds.: *2005 Physics Education Research Conference Proceedings*, 77-80.
- BUCY, B.; THOMPSON, J.; MOUNTCASTLE, D. (2007) Student (Mis)applications of Partial Differentiation to Material Properties. *Physics Education Research Conference 2006*. Syracuse, New York: Volume 883, pp. 157-160.
- BUNGE, M. (1978) *Filosofía de la Física*, Barcelona, Ariel.
- BUTY, C. (2001) "Utilization d'un modèle informatisé informatique en classe réelle". Actes du colloque ARDIST, Carry le Rouet, pp 81-89
- CALLEN, H. (1985) *Termodinámica. Introducción a la Termostática*. ALFA CENTAURO.
- ČÁPEK, V.; SHEEHAN, D. (2005). *Challenges to the Second Law of Thermodynamics: Theory and Experiment*. Springer, Netherlands.
- CÁRDENAS RAMÍREZ, A. (1992) La máquina de vapor y la termodinámica. Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco.
- CARSON, E., WATSON, J. (2002) Undergraduate students' understandings of entropy and Gibbs free energy. *University Chemistry Education*, 6, 4-12.
- CARNOT, S. (1987) *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Alianza Editorial.
- CASADEI CARNIEL, L.; CUICAS AVILA, M.; DEBEL CHOURIO, E.; ALVAREZ VARGAS, Z. (2008) La Simulación como herramienta de aprendizaje en Física. *Actualidades Investigativas en Educación*, 8(2), 1-27.
- CATALAN, L. ; SERRANO, G.; CONCARI, S. (2010) Construcción de significados en alumnos de nivel básico universitario sobre la enseñanza de física con empleo de software. *Revista Mexicana de Investigación Educativa versión impresa* ISSN 1405-6666.
- CHEVALLARD, Y. (1991) *La transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado*. Bs.As. Aique, 1998.
- CHEVALLARD, Y. (1999) L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 19 (2): 221-266.
- CHRISTENSEN, W. (2007) An investigation of student thinking regarding calorimetry, entropy, and the second law of thermodynamics Tesis Doctoral. Iowa State University Ames, Iowa.
- CHRISTENSEN, W.; MELTZER, D.; OGILVIE, C. (2009) Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course, *American Journal of Physics*, 77(10), 907-917.
- COBB, P.; GRAVEMEIJER, K. (2008) Experimenting to support and understand learning processes. En A.E. Kelly, R.A. Lesh y J. Y. Baek (Eds.), *Handbook of design research methods in education. Innovations in Science, Technology, Engineering and Mathematics Learning and Teaching* (pp. 68-95). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- COCHRAN, M.; HERON, P. (2006) Development and assessment of research-based tutorial on heat engines and the second law of thermodynamics *Am. J. Phys.* 74 (8) 734-741.
- CONFEDI, (2004) XXXVI Plenario CONFEDI – Jujuy. Avanzar en el desarrollo de actividades en el período 2005-2007 que permitan llegar a desarrollar un "Proyecto estratégico reforma curricular de la Ingeniería Argentina".
- COLLINS, A. (1992) Toward a design science of education. En E. Scanlon & T. O'Shea (Eds). *New directions in educational technology*, Berlin: Springer-Verlag.

- COLLINS, A.; JOSEPH, D.; BIELACZYK, K. (2004) Design research: theoretical and methodological issues. *The Journal of the Learning Sciences*, 13 (1), 15-42.
- COVOLAN, S.; DA SILVA, D. (2005) A entropia no Ensino Médio: utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito. *Ciênc. educ.* (Bauru) vol.11no.1
- DOUADY, R. (1996) Ingeniería Didáctica y Evolución de la Relación con el Saber en las Matemáticas de collège-seconde. En Barbin, E., Douady, R. (Eds.). *Enseñanza de las matemáticas: Relación entre saberes, programas y prácticas*. Francia. Toxiques éditions. Publicación del IREM.
- GARCÍA-COLÍN, L. (1983) Procesos irreversibles en la física contemporánea. Colección Las Ciencias en el Siglo XX. UNAM, Méjico.
- GARCÍA-COLÍN, L. (1990) El concepto de Entropía. *Cuadernos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos*. Dirección General de Publicaciones. Universidad Nacional Autónoma de Méjico.
- GARCÍA-COLÍN, L. (2006) Las ideas de Boltzmann-el problema de la segunda ley de la termodinámica. Conferencia en Colegio Nacional. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- GASCON, J. (1998) Evolución de la Didáctica de las Matemáticas como Disciplina Científica. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. Vol 18 /1, N°52, pp. 7-33.
- GIACOSA, N.; GIORGI, S.; CONCARI, S. (2009) Applets para la enseñanza del electromagnetismo y la óptica. *Memorias del Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Industrial*. Facultad de Ingeniería. UNaM. Octubre, Oberá. p. 1-18, Argentina.
- GODINO, J.; BATANERO, C. (1998). Clarifying the meaning of mathematical objects as a priority area of research in mathematics education. En, A. Sierpiska y J. Kilpatrick (Eds.) *Mathematics Education as a Research Domain: A Search for Identity* (pp. 177-195). Dordrecht: Kluwer, A. P.
- GODINO, J.; RECIO, A. (1998) A semiotic model for analysing the relationships between thought, language and context in mathematics education. En A. Olivier y K. Newstead (Eds.), *Proceedings of the 22nd Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education*, Vol 3, 1.8. University of Stellenbosch, South Africa.
- GODINO, J. (2003) Teoría de las funciones Semióticas: un enfoque ontológico-semiótico de la cognición e instrucción matemática. Departamento de Didáctica de la Matemática. Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Granada.
- GODINO, J. (2011) Indicadores de la idoneidad didáctica de procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas *XIII CIAEM-IACME, Recife, Brasil*.
- GODINO, J.; BATANERO, C.; FONT, V. (2007) The onto-semiotic approach to research in mathematics education. *ZDM. The International Journal on Mathematics Education*, 39 (1-2), 127-135.
- GODINO, J.; BENCOMO, D.; FONT, V.; WILHELMI, M. (2007) Análisis y valoración de la idoneidad didáctica de procesos de estudio de las matemáticas. *Paradigma*, XXVII (2), 221-252.
- GODINO, J.; FONT, V.; CONTRERAS, A.; WILHELMI, M. (2006) Una visión de la didáctica francesa desde el enfoque ontosemiótico de la cognición e instrucción matemática. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 9 (1), 117-150.
- GODINO, J.; CONTRERAS, A.; FONT, V. (2006) Análisis de procesos de instrucción basado en el enfoque ontológico-semiótico de la cognición matemática. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, 26 (1), 39-88.

- GODINO, J.; WILHELMI, M.; BENCOMO, D. (2005) Suitability criteria of a mathematical instruction process. A teaching experience of the function notion. *Mediterranean Journal for Research in Mathematics Education*, 4.2: 1–26.
- GODINO, J.; BATANERO, C. (1994) Significado institucional y personal de los objetos matemáticos. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 14 (3): 325-355.
- GODINO, J.; RECIO, A. (2001) Significados institucionales de la demostración. Implicaciones para la educación matemática En: **Enseñanza de las ciencias**, Vol. 19, nº 3, Páginas p. 405-414.
- GODINO, J.; FONT, V. (2007) Algunos desarrollos de la teoría de los significados sistémicos. URL: http://www.ugr.es/~jgodino/indice_eos.htm.
- GODINO, J.; BATANERO, C. (1994) Significado institucional y personal de los objetos matemáticos. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 14 (3): 325-355.
- GODINO, J. (2002) Un enfoque ontológico y semiótico de la cognición matemática. *Recherches en Didactiques des Mathématiques*, 22 (2/3): 237-284.
- GODINO, J. ; RECIO, A.; ROA, R.; RUIZ, F.; PAREJA, J.; (2005) Criterios de diseño y evaluación de situaciones didácticas basadas en el uso de medios informáticos para el estudio de las matemáticas pp. 235-242 Sociedad Española de Investigación en Educación Matemática, SEIEM.
- GOULD, H.; TOBOCHNICK, J. (2006) Thermal and Statistical Physics. Gustavus Adolphus College.
- GRANVILLE, M. (1985) Student misconceptions in thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, 62(10),847-848.
- GRECA, I.; SEOANE, E.; ARRIASSECQ, I. (2013). Simulaciones en ciencia y simulaciones en la enseñanza de las ciencias: ¿comparten los mismos debates epistemológicos? *Ciencia escolar. Enseñanza y modelización*. Universidad Central de Chile vol.3 Nº 1, pp 59-74.
- HARVEY, S. (2007) Entropy, Its Language, and Interpretation Springer Science+Business Media.
- JAÉN, X.; NOVELL ENRECH, M.; BOHIGAS, X. (2006). Cómo, cuándo, dónde utilizar "applets" como ayuda al aprendizaje de las ciencias. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, ISSN 1133-9837, Nº 50, 2006, págs. 31-38.
- JANCOVICI, B. (1997) Physique Statistique et thermodynamique. Paris : Ediscience
- JOHNSTONE, A.; MACDONALD, J.; WEBB, G. (1977) Misconceptions in school thermodynamics. *Physics Education*, May, 248-251.
- KELLY, A.; LESH, R.; BAEK, J. (Eds.) (2008) Handbook of design research in methods in education. Innovations in science, technology, engineering, and mathematics learning and teaching. New York, NY: Routledge
- KESIDOU, S.; DUIT, R. (1993) Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics - An Interpretive Study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), 85-106.
- KITTEL, C. (1973) Física Térmica. Editorial Reverté
- KOFMAN, H. (2004) Integración de las funciones constructivistas y comunicativas de las NTICs en la Enseñanza de la Física universitaria. *Revista de Enseñanza de la Física*. Vol 17. Nº1. pp: 51 – 62.
- KOFMAN, H. (2005) Realidad y Virtualidad en la Enseñanza de la Física con NTICS. Un Enfoque desde la Perspectiva de la Educación Integral. *Congreso en TICs en la Enseñanza de las Ciencias*, Santiago del Estero, Argentina.
- KUHN, T. (1996). La Tensión Esencial. Fondo de Cultura Económica.

- KULKARNI, V.; TAMBADE, P. (2013) Enhancing the Learning of Thermodynamics using Computer Assisted Instructions at Undergraduate Level
- LAKOFF, G.; NÚÑEZ, R. (2000). *Where mathematics comes from: How the embodied mind brings mathematics into being*. New York: Basic Books.
- LANDSBERG, P. (1964) A deduction of Carathéodory's principle from Kelvin's principle, *Nature* 201 485–486.
- LANDSBERG, P. (1984) Is Equilibrium an Entropy Maximum? *Journal of Statistical Physics* 35: 159, 169.
- LAUFER, G. (1983) Work and heat in the light of (thermal and laser) light, *Am. J. Phys.* 51 42–43. *Journal of Mathematical Chemistry* Vol. 28, Nos. 1–3, 2000.
- LAURILLARD, D. (1981) The promotion of learning using CAL. En *Computer Simulation in University teaching*. Amsterdam: Wildenberg D.
- LOVERUDE, M. (2009) Student understanding of basic probability concepts in an upper-division thermal physics course. *2009 Physics Education Research Conference Proceeding*.
- LOVERUDE, M. (2010) Investigating Student Understanding for a Statistical Analysis of Two Thermally Interacting Solids. *2010 Physics Education Research Conference Proceedings*.
- MARSHALL, T. (1978) A simplified version of Carathéodory thermodynamics, *Am. J. Phys.* 46 136–137.
- MARCHISIO, S. (2003) Tecnología, Educación y Nuevos ambientes de aprendizajes. Una revisión del campo y derivaciones para la capacitación docente. *Revista RUEDA*. Vol. 5. La Rioja, Argentina.
- MARTINEZ, R. (2012) *La teoría de la radiación del cuerpo negro*. *MOMENTO - Revista de Física*; núm. 19 (1999); 59-75 0121-4470.
- MELTZER, D. Students' Reasoning About Entropy in Chemical and Physical Contexts, at the 2011 Winter Meeting of the American Association of Physics Teachers, Jacksonville, Florida, January 10, 2011 [Session CG].
- MORENO GONZÁLEZ, A. (2006) Atomismo versus Energetismo: Controversia científica a finales del siglo XIX. *Enseñanza de las Ciencias* 24(3), 411-428.
- MORIN, E. (1977) *El método, I: La naturaleza de la naturaleza*. Madrid, Cátedra, 1981.
- MOULINES, U. (2011) Reconstrucción estructuralista de las teorías termodinámicas de Rudolf J. Clausius. *Stoa* Vol. 3, No. 5, 2012, pp. 109–136. (www.uv.mx/stoa/files/2012/04/Moulines.pdf)
- ORDÓÑEZ RODRÍGUEZ, F. (1987) Introducción, traducción y notas a *Sadi Carnot*. *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Alianza, Madrid.
- ORDÓÑEZ RODRIGUEZ, J. (1986) Introducción, traducción y notas a *Ludwig Boltzmann*. *Escritos de mecánica y termodinámica*. Alianza, Madrid.
- PEREZ CRUZ, J. (2008). La Termodinámica de Carnot a Clausius. Conferencia en el curso “La Ciencia Europea antes de la Gran Guerra”. Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, Tenerife.
- PINTO CASULLERAS, R. (1991) Algunos conceptos implícitos en la 1ra y la 2da Ley de la Termodinámica: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje. (Tesis Doctoral). Departamento de Física, Universidad Autónoma de Barcelona.
- PIPPARD, A. (1957) *Elements of Classical Thermodynamics* Cambridge University Press, New York, p. 38.

POGLIANI, L.; BERBERAN-SANTOS, N. (2000) Constantin Carathéodory and the axiomatic thermodynamics. *Journal of Mathematical Chemistry* Vol. 28, Nos. 1–3, 2000- 0259-9791/00/1200-0313\$18.00/02000 Plenum Publishing Corporation.

REIF, F. (1969), Física estadística. Editorial Reverté, Barcelona.

REYNOLDS, W. (1967) Termodinámica, McGraw Hill.

RIBEIRO, G.; (1992). Entropy and the second principle of Thermodynamics - Fourth year undergraduates' ideas. *Research in Assessment*, Vol. IX, 23–36, Royal Society of Chemistry, London.

SANCHEZ-RON, J. (1995). La ciencia, su estructura y su futuro, Editorial Debate, Madrid.

SCHULTZ, T.; CODDINGTON, M. (1981) Development of the concepts of energy conservation and entropy. *Journal of Experimental Child Psychology*, 31, 131-153.

SEARS, F. (1963) A simplified simplification of Carathéodory's treatment of thermodynamics, *Am. J. Phys.* 31 747–752.

SELEPE, C.; BRADLEY, J. (1997) Student-Teacher's Conceptual Difficulties in Chemical Thermodynamics. En M. Sanders (Ed), *SAARMSE Fifth Annual Meeting* (pp. 316-321). Universidad de Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.

SFARD, A. (1991) On the dual nature of mathematical conceptions: Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, 22 (1): 1-36.

SHÖN, D. (1992) La formación de profesionales reflexivos. Paidós-MEC, Barcelona.

SIERRA, J. (2000) Informática y enseñanza de las ciencias. En F.J. Perales y P. Cañal (Eds.) *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (339-359). Alcoy: Marfil.

SIERRA, J.; PERALES, F. (2007) La simulación por ordenador en el aprendizaje por investigación de la física en bachillerato. Colección enseñanza de las ciencias. Educación Editora .ISBN 978-84-690-4622-7 /D.L. OU-28/2007.

SOZBILIR, M. (2001) A Study of Undergraduates' Understandings of Key Chemical Ideas in Thermodynamics. Tesis Doctoral, University of York, York, UK, 495 p.

SÖZBILIR, M.; BENNETT, J.(2007) A study of turkish Chemistry undergraduates' understandings of entropy. *Journal of Chemical Education*, 84(7), 1204–1208.

SPERANDEO, R. (2000) Teaching the entropy concept by transforming Boltzmann's conjectures into computer experiments. *Acta Scientiarum* 22(5):1249-1261.

TARSITANI, C.; VICENTINI, M. (1996) Scientific mental representations of thermodynamics. *Science & Education*, 5, 51-68.

THOMAS, P.; SCHWENZ, R. (1998) College Physical Chemistry Students' Conceptions of Equilibrium and Fundamental Thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(10), 1151-1160.

THOMAS, R.; NEILSON, I. (1995) Harnessing simulations in the service of education: The interact simulations environment. *Computers & Education*, 25, 21-29.

TIMBERLAKE, T. (2010) The statistical Interpretation of Entropy: An Activity. Berry College, Mount Berry, GA. The Physics Teacher Vol. 48.

TORRADO, M. (1998) De la Evaluación de Aptitudes a la Evaluación de Competencias. ICFES Bogotá.

- TURNER, L. (1960) Simplification of Carathéodory's treatment of thermodynamics. *Am. J. Phys.* 28 781–786.
- UFFINK, J. (2001) Bluff your way in the second law of thermodynamics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32, 305-394.
- UTGES, G.; FERNÁNDEZ, P.; JARDON, A. (2003) Simulaciones en la Enseñanza de la Física. Nuevas Prácticas, Nuevos Contenidos. Memorias de REF XIII, Río Cuarto.
- UTGES, G.; FERNANDEZ, P.; JARDON, A. (2011) Simulaciones en la enseñanza de la física. La ilusión de la interactividad y las rutinas del profesor *Revista de enseñanza de la física*, Vol. 24, Nº. 2, pp.27-48.
- VALENTE, M.; NETO, A. (1992) El ordenador y su contribución a la superación de las dificultades del aprendizaje en mecánica. *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (1), 80-85.
- VERGNAUD, G. (1990) La teoría de los campos conceptuales *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 10,nº 2, 3, pp. 133-170, 1990.
- VINCE, J. (2000), *Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de Seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation.* Tesis Doctoral. Universidad de Lyon 2.
- WEBER, J. (2009) *Post-secondary Science Students Conceptions of Randomness and Entropy.* Tesis Doctoral. Universidad de Georgia.
- WILSSON, S. (1981) Sadi Carnot. *Investigación y Ciencia*, 61, 107-116.
- WOLANSKY, S.; LOZECO, C. (2005), *Acerca de las competencias. Un aporte al Proyecto Estratégico de Reforma Curricular de las Ingenierías.* Consejo Federal de Decanos de Ingeniería, XXXVIII Reunión Plenaria. Villa Carlos Paz (Cba.).
- ZEMANSKY, M. (1970) *Calor y Termodinámica*, Aguilar.

ANEXO A:

GUÍA DE ACTIVIDADES

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 1: Urna de Boltzman

Introducción

La simulación representa resultados del procedimiento de extracción de un número de bolitas de una urna que contiene igual número de bolitas rojas y azules. Lo único que distingue a una bolita de otra es el color. Se puede establecer el número de bolitas a extraer y el número de extracciones a realizar. En pantalla aparece una urna conteniendo las bolitas de colores con algunos botones que permiten operar opciones de configuración interna. Un botón permite modificar la velocidad de extracción desde un modo lento hasta un modo más rápido; otro botón permite fijar el número de bolitas a extraer (de 2 a 15); otro botón permite elegir el número de extracciones (de 1 a 991) y finalmente un botón permite visualizar los histogramas de frecuencia y la probabilidad en función del número de bolitas azules extraídas. En el applet se observan las bolitas azules.

Objetivos.

- Distinguir entre frecuencia y probabilidad
- Adquirir concepto de configuración, macroestados y microestados.

Actividades

1.1.- Frecuencia y Probabilidad

a) Como primer paso, explorar la simulación y analizar los casos que se indican en la tabla siguiente. Para cada caso, capturar las imágenes de las gráficas de frecuencia y probabilidad e insertarlos en la hoja:

Nº de bolitas a extraer	Nº de extracciones
3	4
3	50
15	4
15	50
15	990

a) Responder las siguientes cuestiones:

- ¿En qué casos las gráficas de probabilidad y frecuencia se aproximan más entre sí?
- ¿Cómo cambia la curva de probabilidad con el aumento del número de bolitas extraídas?
- El applet solo admite extraer un máximo de 15 bolitas y 1000 extracciones. ¿Qué sucedería para 15 bolitas en las gráficas de probabilidad y frecuencia, si se pudiera hacer un número de extracciones muy grande, como por ejemplo 10000 extracciones?

1.2.- Macroestados y Microestados. Multiplicidad

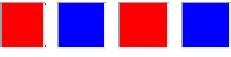
a) Extracción de cuatro bolitas

Presentamos más abajo una tabla, en la que se muestran los modos posibles que pueden ocurrir en la extracción de 4 bolitas. Cada cuadradito coloreado indica una bolita (azul o roja). Caracterizamos cada configuración por el número de bolitas azules. Las posibles configuraciones serán: A: 4 bolitas azules; B: 3 bolitas azules; C: 2 bolitas azules; D: 1 bolita azul; E: 0 bolitas azules. Cada configuración constituye un macroestado. A cada macroestado corresponde un valor de multiplicidad que viene dado por el número de microestados asociados con él.

Observamos que:

- la configuración A puede obtenerse de 1 solo modo (1 microestado)
- la configuración B puede obtenerse de 4 modos (4 microestados)
- la configuración C puede obtenerse de 6 modos (6 microestados)
- la configuración D puede obtenerse de 4 modos (4 microestados)
- la configuración E puede obtenerse de 1 solo modo (1 microestado)

Completar la tabla y responder cuál es el macroestado más probable; cuál es la cantidad de microestados que le corresponde y cuál es la cantidad total de microestados total del sistema.

I	II	III	IV	(Macroestados)	Multiplicidad (Nº de microestados) Ω	Probabilidad
				A	1	1/16
				B	4	
						
						
						
				C	6	
						
						
						
						
						
				D	4	
						
						
						
				E	1	

b) Caso general (N bolitas)

En el caso anterior, la multiplicidad (Ω) puede determinarse fácilmente contando los microestados correspondientes a cada macroestado. Pero si el número de bolitas a extraer es mayor, la situación se complica, por lo que importa contar con una expresión general que permita realizar el cálculo.

Consideremos extracciones de N bolitas. Los diferentes macroestados corresponderán a 1 bolita azul; 2 bolitas azules;; (N-1) bolitas azules; N bolitas azules.

Nos interesa el número de modos distintos en que podemos extraer N bolitas con una configuración determinada, es decir, n_b bolitas azules y n_r bolitas rojas. No nos importa el orden en que las bolitas son extraídas.

El número de diferentes modos en que es posible ordenar N objetos distintos es **N!** (**permutaciones de N**). Pero el número de modos de la configuración mencionada será menor que **N!**, ya que no nos interesan las permutaciones de las bolitas azules entre sí, ni de las rojas entre sí (las bolitas azules son indistinguibles entre sí; ídem las rojas).

Entonces, el número de modos en que podemos obtener n_b bolitas azules y n_r rojas en N extracciones viene dado por:

$$\Omega = N! / (n_b! n_r!)$$

O, teniendo en cuenta que $n_r = N - n_b$,

$$\Omega = N! / n_b! (N - n_b)!$$

Otro modo de explicar la expresión es la siguiente:

Hay un sólo modo de ordenar N esferas idénticas, ya que, siendo idénticas, cualquier sucesión es equivalente a cualquier otra; mientras que hay muchos modos diferentes de ordenar N esferas distintas: N esferas, todas diferentes, pueden ser ordenadas en **N!** (*factorial de N*) modos distintos (la primera en N modos, la segunda en (N-1) modos, etc....), pero si n_b son idénticas entre sí y n_r son también idénticas entre sí (aunque diferentes de las precedentes), $n_b!$ y $n_r!$ modos no son más distintos, y el número **N!** deberá ser dividido por $n_b!$ y por $n_r!$.

Si la urna hubiese contenido tres colores (azul, rojo y verde), el número de modos en que habríamos podido obtener n_b bolitas azules, n_r bolitas rojas y n_v verdes, viene dado por:

$$\Omega = N! / (n_b! n_r! n_v!)$$

Podemos ahora generalizar la expresión. El número de modos distintos de una partición de N partículas en n grupos distintos ($n_1! n_2! n_3! \dots n_n!$) formados sobre la base de n propiedades distintas (color, valor de la energía, dimensiones,.....), es:

$$\Omega = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$$

iv. **Aplicación del caso general.** Análisis para el caso en que se extraen 15 bolitas.

Con ayuda de una planilla Excel, completar la tabla siguiente para el caso de extracción de 15 bolitas y representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad en función del número de bolitas azules.

n_b (cantidad de bolitas azules)	Multiplicidad (Ω) $\Omega = N!/n_b!(N-n_b)!$	Probabilidad
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Comparar la gráfica de probabilidad obtenida con la que presenta el applet para el caso de extracción de 15 bolitas.

Responder:

- ¿Cuál es el macroestado con mayor número de microestados y por ende el más probable?
- ¿Cuál es el número total de microestados?

v. Análisis comparativo.

Utilizando una planilla Excel, analizar los casos correspondientes a $N=20$ y $N=100$, completando los datos de la siguiente tabla. Representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad para cada caso.

N= 20			N=100		
n_b	Ω	Probabilidad	n_b	Ω	Probabilidad
0			0		
1			5		
2			10		
3			15		
4			20		
5			25		
6			30		
7			35		
8			40		
9			45		
10			50		
11			55		
12			60		
13			65		
14			70		
15			75		
16			80		
17			85		
18			90		
19			95		
20			100		

Responder:

- ¿Qué diferencias se observan en las gráficas de los dos casos anteriores? Explicar.
- ¿Qué forma adoptarían dichas gráficas si N fuera enormemente grande?

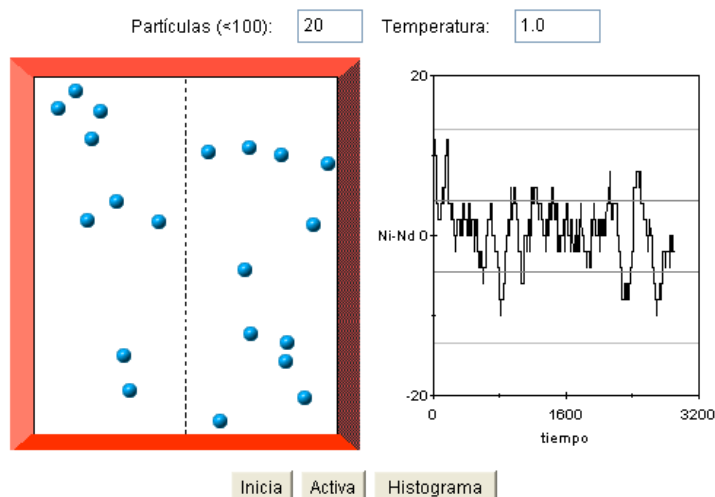
TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN:

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 2: Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio

Introducción

El applet simula moléculas de un gas ubicadas en una caja. El modelo es bidimensional y las moléculas son representadas por discos rígidos. Se consideran para el análisis solo las posiciones de las moléculas y de un modo muy simplificado: se analiza solamente como se reparten las moléculas en cada momento entre la mitad izquierda y la derecha de la caja. Concretamente, la variable que se contabiliza es la diferencia entre el número de moléculas ubicadas en la mitad izquierda y el número de moléculas ubicadas en la mitad derecha ($N_i - N_d$).



El applet permite variar el número de moléculas y la temperatura. Inicialmente todas las moléculas están ubicadas en la mitad izquierda.

El modelo es similar al caso ya analizado de la Urna de Boltzmann. El número de bolitas azules en ese caso, corresponde aquí al número de moléculas en el lado izquierdo. Cada extracción en la Urna corresponde aquí a un suceso con una distribución particular de moléculas a la izquierda y a la derecha.

Es importante tener en cuenta que el modelo utilizado en el applet es sumamente simplificado y no contempla adecuadamente toda la complejidad correspondiente a la representación de un gas. Por un lado, las variables que deberíamos considerar incluyen la velocidad de las moléculas, además de su posición. Por otro lado, la posición ha sido solo considerada en una dimensión y con sólo 2 valores discretos (izquierda y derecha).

A diferencia de la Urna, este applet nos muestra la secuencia temporal. A la derecha del recipiente una gráfica muestra permanentemente ($N_i - N_d$) en función del tiempo. Nótese que el applet no representa el número de moléculas a la izquierda (N_i) sino la diferencia $N_i - N_d$. De modo equivalente, en los gráficos de la Urna de Boltzmann podría haberse trabajado con la diferencia entre el número de bolitas azules y el número de bolitas rojas.

Abajo del recipiente se encuentran 3 botones. Pulsando **Inicia**, comienza la evolución en la que las moléculas se mueven aleatoriamente. El botón **Pausa** detiene el proceso. Para continuar hay que pulsar **Activa**. El botón **histograma** abre una ventana que muestra la gráfica de frecuencia de ($N_i - N_d$). Pulsando ese botón en distintos momentos pueden obtenerse gráficos sucesivos que permiten observar cambios en la frecuencia.

Objetivos:

- Analizar la noción de equilibrio y el concepto de irreversibilidad desde una perspectiva microscópica.

- Observar que en el equilibrio el valor medio de las magnitudes macroscópicas se mantiene constante, aunque dichas magnitudes muestran fluctuaciones en torno a ese valor medio.
- Observar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con N (número de partículas del sistema)

Actividades.

2.1 Equilibrio y fluctuaciones en el equilibrio

- Fijar el número de partículas en 2; luego en 4; luego en 10; luego en 20, luego en 60 y finalmente en 90. En todos los casos fijar la temperatura en un valor 8. Una vez que inicie la simulación, dejar correr el tiempo y para cada caso, apretando pausa, capturar: la imagen del recipiente; la gráfica que aparece a la derecha y el histograma correspondiente, insertándolos en la hoja. Analizar las gráficas y explicar las diferencias.
- Responder las siguientes cuestiones
 - En los casos analizados, ¿diría que el sistema ha alcanzado el equilibrio? ¿Cómo caracterizaría usted equilibrio?
 - ¿Se mantiene constante el número de partículas en el lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio? Si no es así, ¿en qué consiste el equilibrio?
 - Considere la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo de cada uno de los casos anteriores. Describa de modo cualitativo el comportamiento de $(N_i - N_d)$ en función del tiempo en el equilibrio. ¿qué indican las variaciones o fluctuaciones que se observan en la gráfica? ¿Cuál es el valor medio de $N_i - N_d$? ¿Ese valor medio varía o permanece constante en el tiempo?
 - ¿Podría asociar N_i y N_d con alguna variable macroscópica, en el caso de que se tratara de las moléculas de un gas? ¿Cómo describiría el comportamiento de esa variable en el equilibrio?
 - ¿Considera que las variaciones o fluctuaciones son perceptibles o podrían detectarse a través de algún instrumento? ¿Cambia su respuesta en función del número de moléculas N utilizadas en el modelo? Explique.

2.2. Irreversibilidad y la dirección del tiempo.

La experiencia nos dice que un gas se expande hasta ocupar todo el recinto, y que nunca se observa que el gas se vuelva a concentrar en una parte del recipiente. Se argumenta así que la evolución temporal nos conduce de un estado inicial, con el gas concentrado en una región, a un estado final, con el gas ocupando todo el recinto. Pero la situación inversa no se observa. Por ello, la secuencia de estados tiene una dirección temporal determinada y se dice que el proceso es irreversible.

Considerando los casos analizados en la simulación, diría Ud. que los procesos observados son irreversibles? Depende su respuesta del valor de N considerado? Explicar.

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 3: Tirada de monedas

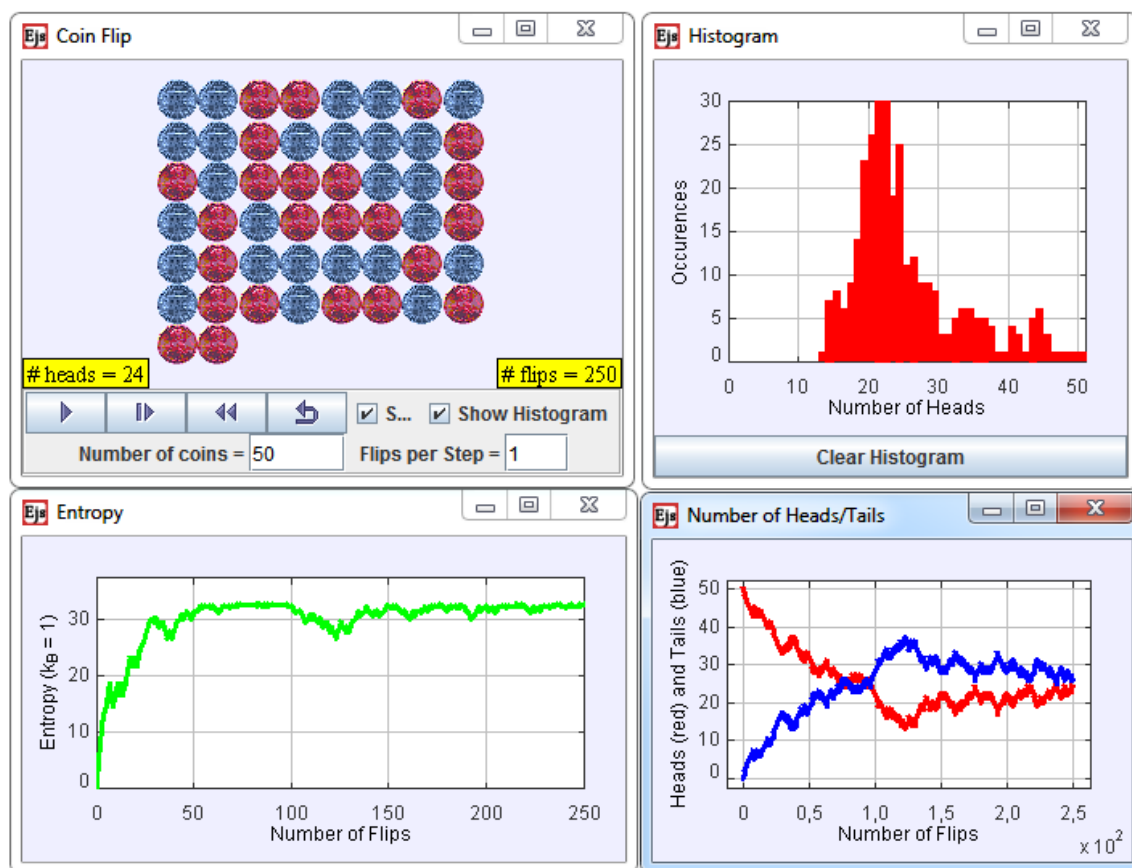
Introducción

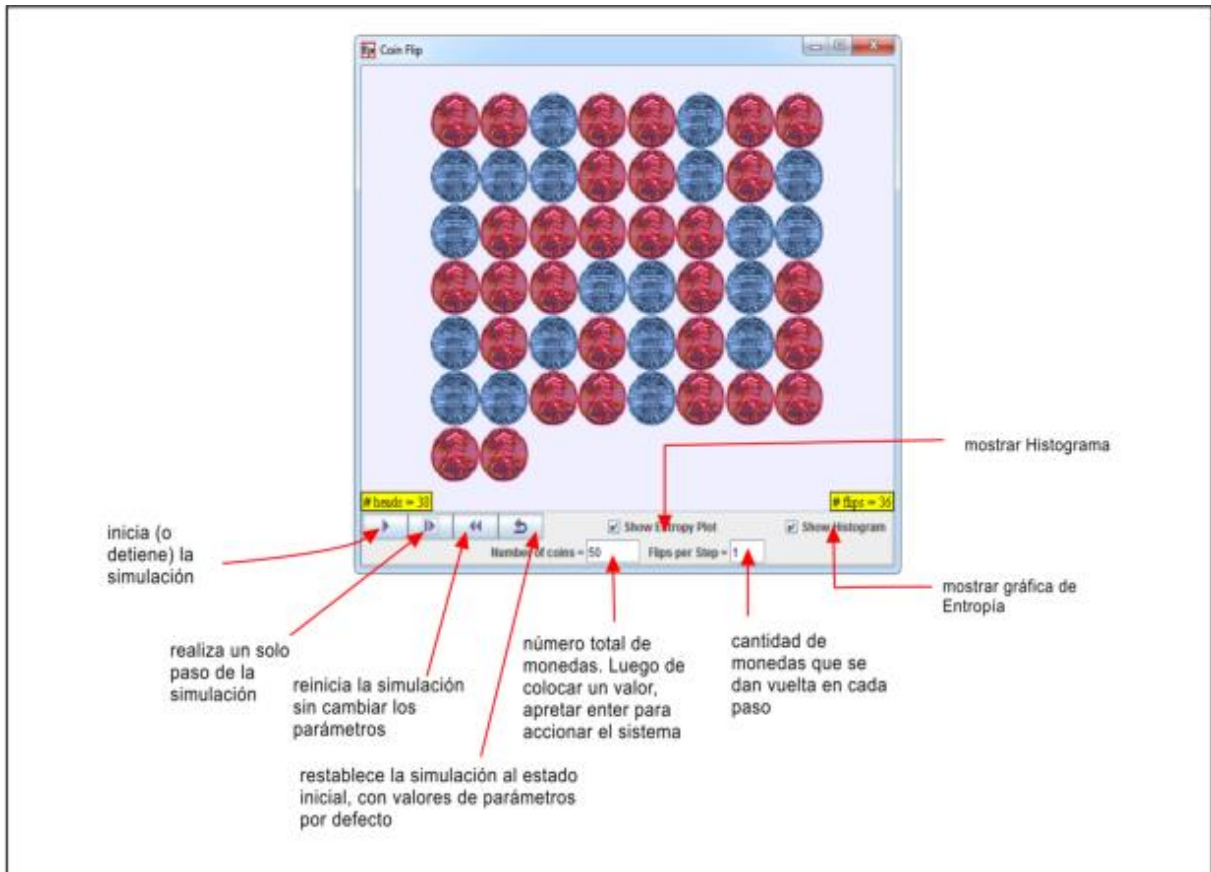
La simulación modela un sistema simple de N monedas dispuestas en filas ordenadas. Inicialmente todas las monedas están con la cara hacia arriba. En cada paso de la simulación una moneda es elegida al azar y dada vuelta. Una ventana de animación muestra el conjunto de monedas (con las caras en color rojo, y cruces en color azul). Se muestra gráficamente el número de caras (en rojo) y cruces (azul) en función del tiempo (en realidad, en función del número de pasos realizados).

Dos botones en la consola principal permiten además abrir dos ventanas en las que se representa el histograma de frecuencias (del número de veces que el sistema ha tenido un determinado número de caras hacia arriba) y la “entropía” del sistema, calculada como $S = k \ln \Omega$ se adopta $k = 1$

El usuario puede cambiar el número total de monedas (de 2 a 2000) colocando el número deseado en la ventana correspondiente (hay que presionar ENTER para que el sistema acepte el nuevo valor, y luego el botón de inicio para comenzar). También puede establecerse el número de monedas que el sistema da vuelta (flips) en cada paso (step), colocando el número deseado en Flips per Step (un valor grande hace que la simulación funcione más rápido).

Las figuras siguientes muestran las ventanas disponibles y los controles en la consola principal.





Objetivos:

- Profundizar las características del equilibrio en un sistema análogo al caso de las partículas en una caja.
- Verificar la diferencia en el comportamiento del sistema para valores grandes y pequeños de N . Observar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con N (número de partículas del sistema)
- Analizar cómo varía la entropía del sistema en función del tiempo y observar el comportamiento de $S(t)$ para valores grandes y pequeños de N .
- Establecer relaciones en el comportamiento de las diferentes gráficas que describen el sistema.

Actividades.

3.1- Explorando la Simulación.

a) Observe el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de monedas. Pruebe con 2, 4, 20, 100, 1000, 2000 monedas. En cada caso observe los cambios que se producen en las tres ventanas disponibles. Puede seguir las simulaciones paso a paso o dejarlas correr de manera continua. También puede elegir dar vuelta una moneda por paso o más monedas en cada paso.

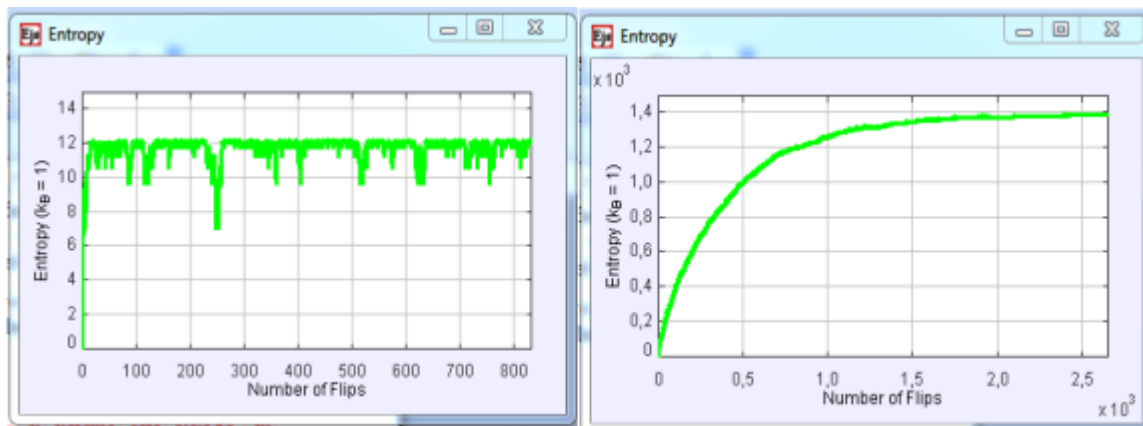
b). Capture las imágenes para los casos de 20 y para 1000 monedas. En ambos casos corra las simulaciones a razón de 1 flip por step y tome las imágenes cuando se hayan transcurrido 200 flips. Analice las gráficas obtenidas y explique cualitativamente las diferencias que observa entre los dos casos considerados. ¿A qué atribuye Ud. las diferencias observadas?

3.2. Equilibrio y fluctuaciones en el equilibrio.

- a) Considere el caso de 1000 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio?
- b) Considere el caso de 10 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio?
- c) ¿Qué valor toma, en el equilibrio, la variable “número de caras” para los casos considerados en (a) y en (b)? ¿Puede dicho valor considerarse constante, o presenta fluctuaciones? Explique.

3.3. Entropía

- a) Las gráficas de abajo representan la entropía del sistema para 20 monedas y 2000 monedas respectivamente. Como puede verse, son muy diferentes. Intente explicar por qué se dan esas diferencias.



- b) Cuando consideramos sistemas reales, sabemos que, cuando el sistema está aislado, su entropía crece hasta alcanzar un valor estable máximo. En el caso de la tirada de monedas, ¿es válida esta afirmación en los sistemas de pocas monedas? A partir de qué número de monedas podemos considerar que se produce esa tendencia?

3.4. Relación entre la tirada de monedas y las partículas en una caja

Compare la simulación “Tirada de monedas” con la realizada en la actividad 2 que corresponde a las partículas en una caja. ¿En que sentido se las puede considerar semejantes? Explique

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 4: Multiplicidad

Introducción

El applet muestra de cuantos modos podemos distribuir una energía dada E_T entre un número determinado N de partículas. La energía total viene dada por la suma de las energías de cada partícula. A cada partícula puede atribuírsele una unidad discreta de energía, de valor 1ε , 2ε , 3ε ..., compatible con la energía total. La energía total, que se mantiene fija, queda entonces expresada en función de las energías individuales por la siguiente expresión:

$E_T = n_1 \cdot 1\varepsilon + n_2 \cdot 2\varepsilon + n_3 \cdot 3\varepsilon + \dots + n_n \cdot n\varepsilon$, donde $n_1, n_2, \dots, n_n$ representan respectivamente el número de partículas que poseen las energías $1\varepsilon, 2\varepsilon, \dots, n\varepsilon$. (con $n_1 + n_2 + \dots + n_n = N$).

A diferencia del applet anterior, esta simulación no presenta una secuencia temporal. Sólo muestra, para diferente número de partículas N y de valores de energía total E_T , todas las configuraciones posibles, y los diferentes modos (diferentes microestados) en que las partículas pueden disponerse en cada configuración. En este caso, los microestados están caracterizados en términos de la energía, sin ninguna referencia a coordenadas espaciales.

Objetivos

- Observar las diferentes configuraciones (macroestados) de las partículas respecto de la ocupación de los niveles de energía y los microestados asociados a cada una de ellas.
- Reconocer el macroestado de mayor probabilidad ($\Omega_{\max}$) y asociarlo con la situación de equilibrio.
- Interpretar las fluctuaciones en el equilibrio a partir de las probabilidades de los diferentes macroestados.

Actividades:

4.1. Análisis de algunos casos

a) Trabajando con 4 partículas y una energía total igual a 8, analice todas las configuraciones posibles; el número de microestados correspondientes a cada configuración y complete la siguiente tabla: En cada caso capturar las imágenes que correspondan; insertarlas en la hoja y discutir la distribución

	Macroestado	Número de microestados (Ω)	Probabilidad
I	$1\varepsilon, 1\varepsilon, 1\varepsilon, 5\varepsilon$	4	
II			
III			
IV			
V			
Número Total de microestados			

b) El applet sólo muestra hasta un máximo de cinco partículas y energía igual a 11. Capturar las imágenes para esa distribución y analizar los resultados obtenidos. Calcular Ω .

4.2. Análisis de 6 partículas con Energía Total 12

Para valores mayores, los números se hacen muy grandes, pero aparece una situación interesante. La tabla muestra las 11 distribuciones posibles en el caso en que **$N=6$ y $E_T= 12$**

	Macroestado	Número de microestados (Ω)	Probabilidad
I	7ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε	6	
II	6ε, 2ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε	30	
III	5ε, 3ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε	30	
IV	5ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε, 1ε	60	
V	4ε, 4ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε,	15	
VI	4ε, 3ε, 2ε, 1ε, 1ε, 1ε,	120	
VII	4ε, 2ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε,	60	
VIII	3ε, 3ε, 3ε, 1ε, 1ε, 1ε	20	
IX	3ε, 3ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε	90	
X	3ε, 2ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε,	30	
XI	2ε, 2ε, 2ε, 2ε, 2ε, 2ε.	1	
Número Total de Microestados		462	

Se observa que hay una configuración que tiene un número de microestados notablemente más grande que las otras, y, por lo tanto, una probabilidad mucho más alta. Llamaremos a ésta configuración: configuración más probable, y es a la que puede asociarse un mayor número de microestados. En el caso indicado en la tabla, la configuración VI tiene una probabilidad del orden del 26 % $[(120/462)*100]$.

Supongamos entonces, que el sistema se hubiera preparado de modo tal que se encontrara inicialmente en el macroestado II, y que luego las partículas (por razones internas, como por ejemplo, interacciones entre ellas), pudieran cambiar de nivel, manteniendo el sistema aislado, es decir, sin modificar su energía total. El sistema podría estar entonces en cualquiera de sus 462 microestados, pasando sucesivamente por cualquiera de ellos. Sin embargo, como el macroestado VI es el más probable, el sistema se encontrará la mayor parte del tiempo en alguno de los 120 microestados correspondientes a él. Ese macroestado (donde $\Omega = \Omega_{\max}$) suele denominarse macroestado de equilibrio.

Considerando lo analizado, responder las siguientes cuestiones:

- En el caso anterior, y suponiendo que el sistema está en equilibrio, ¿puede el sistema estar en algún momento en el macroestado (3ε, 3ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε)? ¿y en el (7ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε)? ¿Cuántas más chances tiene el sistema de estar en el primero respecto del segundo?
- Si el sistema se encuentra en equilibrio, puede pasar de un microestado a otro? Si es así, ¿esto produce efectos macroscópicos o cambios macroscópicos en el sistema? ¿Cómo incide en la respuesta el número de partículas N que constituyen el sistema? Piense en el análisis de las fluctuaciones realizado en la actividad de las moléculas en una caja.
- En el caso considerado, el macroestado de equilibrio incluye el 27% del total de microestados del sistema. Si consideramos otro sistema con mayor número de partículas, que piensa que ocurrirá con ese porcentaje? ¿aumenta, disminuye o se mantiene en torno a ese valor?. Justifique su respuesta.

NOTA: Los applets utilizados en el Trabajo Práctico pueden también consultarse en sus páginas de origen:

http://www.griaf.unipa.it/ProTerm/entropia/applets/urna/applet_estrazioni.htm

<http://valbuena.fis.ucm.es/expint/html/sistemas/irrever/fluc.html>

<http://www.compadre.org/psrc/items/detail.cfm?ID=10090&Attached=1>

http://www.griaf.unipa.it/ProTerm/entropia/modi_equilibrio.htm

ANEXO B:

RESPUESTAS DE LOS ESTUDIANTES

RESPUESTAS DE LOS ESTUDIANTES A LAS CONSIGNAS PLANTEADAS EN LA GUÍA DE ACTIVIDADES

TP Nº 1: URNA DE BOLTZMANN		
A	i) ¿En qué casos las gráficas de probabilidad y frecuencia se aproximan más entre sí?	✓ Se aproximan más entre sí en la última gráfica donde se realizan 990 extracciones. ✓ A medida que aumenta el número de extracciones, la gráfica de probabilidad y frecuencia se aproximan más entre sí. ✓ Las gráficas se acercan más entre sí para los casos donde el número de bolitas a extraer es bastante pequeño a comparación del número de extracciones. En este caso las gráficas se asemejan más en el caso donde el nº de bolitas a extraer es 3 y el de extracciones es 990. ✓ Cuando el número de bolitas y la cantidad de extracciones son máximas. ✓ Cuanto más pelotas tenga, en este caso en la experiencia 5 ✓ En la gráfica 5, o sea 15 bolitas con 990 extracciones ✓ En los casos 3, 4 y 5 en los cuales el nº de extracciones (cantidad de muestra de n bolitas) se hace arbitrariamente grande, donde la frecuencia relativa tiende a igualarse con la gráfica de la probabilidad. ✓ Las gráficas de 3 bolitas y 50 extracciones y las de 15 bolitas y 990 extracciones, son las que más se aproximan entre sí. Esto es, al mantener fijo la cantidad de bolitas e ir aumentando la cantidad de extracciones, más se parecen entre sí. ✓ Las gráficas de 3 bolitas y 50 extracciones y las de 15 bolitas y 990 extracciones.
B	ii) ¿Cómo cambia la curva de probabilidad con el aumento del número de bolitas extraídas?	✓ Con el aumento de bolitas la probabilidad se distribuye más entre distintas posibilidades. ✓ La curva se hace cada vez más chata y menos pronunciada ✓ Al aumentar el nº de bolitas, tiene una tendencia a que la cantidad de bolitas azules obtenidas estén en la mitad del total de bolitas posibles de obtener, esto es, si tengo 15 bolitas a extraer, es más probable que salgan 7 bolitas azules en cada extracción, antes que sean las 15 o 1 sola. ✓ Con el aumento del nº de bolitas extraídas la gráfica de

		probabilidades adopta una curva en forma de campana con un pico en los valores de cantidad de bolitas más probables que se encuentra en el centro. ✓ Se parece cada vez más a una campana de Gauss, gráfica de una distribución normal de una variable aleatoria. ✓ La curva de probabilidad adquiere una forma acampanada mejor definida a medida que aumenta el nº de bolitas en cada extracción (muestra). ✓ Al aumentar el nº de bolitas las gráficas se van haciendo más largas y agudas en el centro del eje horizontal, y a su vez cada vez más chatas alejándose del centro. ✓ A medida que aumenta el nº de bolitas la curva de probabilidad será cada vez más puntuda. ✓ A medida que aumenta el nº de bolitas extraídas, se puede ver en la gráfica de probabilidad un pico en la mitad del intervalo de bolitas. Esto quiere decir, que es mucho más probable que se extraigan la mitad de bolitas deseadas en cada extracción. ✓ Al aumenta el nº de bolitas extraídas, la curva de probabilidad se acerca más a la forma de la curva de frecuencia. ✓ Al aumentar el nº de bolitas extraídas, las barras de probabilidad tienden a desaparecer en los extremos 0. 1 y 2 bolitas y 13, 14 y 15 bolitas y concentrarse cada vez más en los valores promedios. ✓ A mayor nº de bolitas extraídas la gráfica de la probabilidad se aproxima a una campana de Gauss más puntiaguda a la altura de la mitad de cantidad de bolitas extraídas. ✓ Con el aumento del nº de bolitas notamos que disminuye el valor máximo de frecuencia.
C	iii) El applet solo admite extraer un máximo de 15 bolitas y 1000 extracciones. ¿Qué sucedería para 15 bolitas en las gráficas de probabilidad y frecuencia, si se pudiera hacer un número de	✓ La gráfica de frecuencia se asemeja notablemente a la gráfica de probabilidad ✓ La curva de probabilidad presenta un pico entre las 7 u 8 bolitas y va a ser muy semejante a la gráfica de frecuencia.

	extracciones muy grande, como por ejemplo 10000 extracciones?	
D	¿Cuál es el macroestado con mayor número de microestados y por ende el más probable? ¿Cuál es el número total de microestados?	Todos los grupos contestaron bien estas preguntas. $N_b = 7$ y $n_b = 8$ El número total de microestados es 2^N donde $N = 15$ $\Omega_{\text{total}} = 32768$
E	Utilizando una planilla Excel, analizar los casos correspondientes a $N=20$ y $N=100$, completando los datos de la siguiente tabla. Representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad para cada caso. ¿Qué diferencias se observan en las gráficas de los dos casos anteriores? Explicar. ¿Qué forma adoptarían dichas gráficas si N fuera enormemente grande?	✓ En los gráficos de multiplicidad se puede observar que ante el aumento de N, para un mismo Macroestado, la multiplicidad aumentó enormemente así como también la cantidad de macroestados que posee una relación directa con el incremento de N. ✓ Por otro lado observando la probabilidad, vemos como se ve reflejado el crecimiento de la multiplicidad en los distintos macroestados provocando la disminución de las probabilidades para los mismos y distribuyéndose más entre los mismos. ✓ Si N fuera enormemente grande la probabilidad de realizar ante una experiencia y encontrarnos ante un mismo Macroestado serían casi nulas. ✓ Para las gráficas de multiplicidad, cuando N es mayor se destaca un pico en cambio cuando es menor la curva es más suave. ✓ En las de probabilidades, cuando N es mayor, el pico se hace menor y la curva es más suave. ✓ Si N es enormemente grande la de multiplicidad toma la forma de un pico pronunciado mientras que las de probabilidades serían una constante. ✓ Comparando los gráficos de ambos casos ($N=20$ y $N = 200$) se nota que hay más probabilidad cuanto mayor sea la cantidad de microestados posibles y esto ocurre en la mitad de la cantidad de bolitas disponibles. ✓ Si N fuese enormemente grande aumentaría mucho la cantidad de microestados posibles, siendo en la mitad de la cantidad de

		bolitas, la de mayor microestados, por lo tanto su posibilidad sería la de mayor valor. ✓ La diferencia que observamos en los diferentes casos es que las mayores probabilidades se centran en un número más chico de macroestados en comparación con la cantidad de bolitas del sistema (el ancho del pico se hace más angosto). ✓ La forma que adoptaría la gráfica si N fuera enormemente grande es de un pico muy angosto. ✓ Observamos que al aumentar N la probabilidad se va centrando más alrededor del Macroestado que más microestados tiene, esto se observa cambiando de N valiendo 20 a 100 y si fuese enormemente grande, el único estado observable sería aquel que mayor microestados tenga ya que las probabilidades de observar otro Macroestado serían despreciables. ✓ A medida que aumentamos N, la probabilidad de los macroestados extremos son despreciables ante la probabilidad de los macroestados centrales. Esto se refleja en la gráfica con un estrechamiento del histograma. ✓ La forma que adoptarían las gráficas, para N tendiendo a infinito, sería la de un único bastón central. ✓ No responde ✓ La diferencia está en que a mayor cantidad de pelotitas, aumenta la probabilidad de que salgan uniformemente ✓ Si N es muy grande la curva de probabilidad será de una campana más estrecha y mucho mayor en el Macroestado de igual distribución de pelotitas. ✓ Al aumentar el número de bolitas, observamos una concentración de valores en el número de bolitas medio, es decir aumenta la probabilidad de obtener un número equilibrado de bolitas, tanto rojas como azules. ✓ La gráfica tendería a centralizar los valores en su punto medio y también incrementaría la probabilidad de que esto ocurra.
	TP Nº 2	IREVERSIBILIDAD Y FLUCTUACIONES EN EL EQUILIBRIO
F	a) Analizar las gráficas y explicar las diferencias	✓ No responde. ✓ Luego de observar las gráficas notamos que la distribución de las bolitas nunca vuelve al estado inicial y siempre tiende a una

		distribución homogénea dentro del recipiente. ✓ A medida que aumenta la cantidad de bolitas la probabilidad de que encontremos igual cantidad de bolitas en cada lado del recipiente es mayor. ✓ Una de las diferencias que se observa es que al aumentar la cantidad de partículas en la caja, aumentan los diferentes estados de distribución en los que se las puede encontrar. También se ve que cuando participan más partículas, disminuye la posibilidad de que vuelvan a su estado inicial (todas a la izquierda) ✓ No responde ✓ La diferencia que se puede apreciar a simple vista entre las distintas gráficas es que manteniendo la temperatura constante, la diferencia entre la cantidad de partículas que se encuentran en el lado izquierdo y en el lado derecho de una caja se va haciendo más chica a medida que se aumenta la cantidad de partículas. ✓ Analizando las gráficas puede verse que al aumentar el nº de partículas sucede lo siguiente: • La gráfica de barras correspondiente a esta experiencia es mucho más aguda teniendo su pico máximo en valores próximos a cero (es decir, en aquel caso en el que hay el mismo nº de partículas en cada lado). • La curva corresponde a un análisis teórico; es también mucho más aguda, aproximando bastante bien a la experiencia real. • En la otra gráfica las fluctuaciones disminuyen su amplitud, es decir, se hace cada vez menos probable que las partículas estén más de un lado que del otro, en otras palabras, tienden a distribuirse más uniformemente en la gráfica. (las barras representan la cantidad de partículas y la curva es un aproximación para el caso de un nº de partículas muy grande). ✓ Hay dos tipos de gráficas, una que muestra $N_i - N_d$ vs tiempo y la otra la frec vs $N_i - N_d$. con diferentes nºs de bolitas. En la primera gráfica se observa la cantidad e bolitas que se encuentran a la izquierda o la derecha respecto al tiempo. En la segunda gráfica se ve la frecuencia en función de las bolitas a la izquierda-derecha, que comparándolas se nota que al aumentar el nº de bolitas, la gráfica frecuencia como $N_i - N_d$ se aproximan. Si fuera un nº de bolitas muy grande la frecuencia como $N_i - N_d$ se encimarían. Se ve claramente que en el centro de la gráfica hay mayor
--	--	--

		posibilidad, o sea, que haya bolitas iguales en los dos sectores tanto el izquierdo como el derecho. ✓ Al observar las gráficas, llego a la conclusión de que, a la misma temperatura, la probabilidad de que haya igual cantidad de partículas a cada lado de la caja es mayor mientras mayor sea la cantidad de partículas en total (al aumentar la cantidad de partículas, las probabilidades se centran en cero). ✓ Con el aumento de la cantidad de partículas se ve que hay una tendencia a que haya la misma cantidad en el lado derecho de la caja como en el izquierdo. La diferencia $N_i - N_d$ se hace más estable y cercano al cero. ✓ A medida que aumenta el nº de partículas, la diferencia entre las N_i y N_d se mantiene en un rango cada vez menor, es decir, se acerca a una constante. Esto se debe a que los gráficos de frecuencias son curvas cada vez más pronunciadas cuando $N_i - N_d = 0$. ✓ Al analizar las distintas gráficas podemos decir que al aumentar el nº de partículas dejando transcurrir un tiempo considerable, es notorio como se dificulta encontrar mayor concentración de un lado respecto al otro, lo que quiere decir que a mayor nº de partículas la posición de equilibrio se acerca a mantenerse constante.
G	a) En los casos analizados, ¿diría que el sistema ha alcanzado el equilibrio? ¿Cómo caracterizaría usted equilibrio?	✓ Al incrementar el número de partículas el sistema tiende con mayor probabilidad a situarse en el equilibrio. El sistema se encontrará en el equilibrio cuando la distribución de las partículas sea equilibrada. ✓ Si, diríamos que el sistema ha alcanzado el equilibrio. El equilibrio puede caracterizarse como una distribución homogénea de las bolitas en ambos lados del recipiente. ✓ Si sería que alcanzó el equilibrio. Caracterizaría a éste como el estado en el que las funciones de estado del sistema asumen un valor constante en el tiempo. ✓ Caracterizaría el equilibrio como el estado en donde la diferencia de partículas a la izquierda y a la derecha es pequeña en comparación del nº total de partículas en la caja. Es más difícil ver el equilibrio en las situaciones donde participan pocas partículas como por ejemplo en la situación donde hay 2, 4 y también 10 partículas, pero a partir de las 20 ya comienza a verse más claro que el sistema llega a un equilibrio.

	✓ En los casos analizados el sistema no ha alcanzado el equilibrio. Se puede decir que este se encontraría en equilibrio cuando la cantidad de partículas que se encuentran ubicadas en el lado izquierdo de la caja es semejante a la cantidad de las mismas ubicadas en el sector derecho. ✓ No está en equilibrio, pero estadísticamente los valores fluctúan en torno al equilibrio, el cual es mucho más probable lograrlo aumentando el nº de partículas. Según nuestro criterio el sistema estaría en equilibrio siempre y cuando las partículas estén equiespaciadas entre sí lo que conlleva a que el nº de partículas que se encuentran a la derecha sea exactamente igual al nº de partículas que hay a la izquierda, cuyo caso solo se cumple cuando el nº de partículas tiende a infinito. Como el planteo de equilibrio es meramente teórico (ya que es imposible contener un nº infinito de partículas) consideraremos que el sistema está en equilibrio cuando la probabilidad de que estén distribuidas entre el lado izquierdo y derecho sea relativamente grande; esto sucede cuando el nº de partículas es grande. ✓ El sistema no se encuentra en equilibrio. El sistema está en equilibrio cuando $N_i - N_d$ es igual a cero. ✓ Sí, porque caracterizamos el equilibrio cuando en un período de tiempo la cantidad de partículas que estuvo en el lado izquierdo es la misma cantidad que estuvo en el lado derecho, en ese mismo período de tiempo. ✓ Parecería haber alcanzado el equilibrio ya que la diferencia $N_i - N_d$ oscila alrededor del cero. ✓ No en todos los casos se puede decir que alcanza el equilibrio ya que en los sistemas con pocas partículas se ve con frecuencia el agrupamiento de discos en alguna de las partes del recipiente. El equilibrio se da cuando el gas se expande ocupando todo el volumen disponible, en nuestro ejemplo el equilibrio se lograría cuando la diferencia de discos del lado izquierdo y derecho sea nula. ✓ Para que un sistema esté en equilibrio yo consideraría que la diferencia $N_i - N_d$ sea cero en un tiempo dado. Desde este punto de vista el estado no ha alcanzado el equilibrio. ✓ El equilibrio lo definiría cuando $N_i - N_d$ sea cero. El sistema está más próximo al equilibrio cuanto mayor sean los números de partículas.
--	--

		✓ Al analizar los distintos casos puedo decir que al aumentar la cantidad de partículas se llega a alcanzar el equilibrio. El equilibrio se puede caracterizar como la equidad cuantitativa de las partes involucradas.
H	a) ¿Se mantiene constante el número de partículas en el lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio? Si no es así, ¿en qué consiste el equilibrio?	✓ No, no se mantiene constante el número de partículas, pero al variar entre valores muy cercanos se puede suponer que está en equilibrio. ✓ El nº de partículas del lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio no se mantiene constante, pero oscila dentro de un margen igual al nº de partículas en el lado derecho. ✓ No necesariamente debe mantenerse constante el nº de partículas en el lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio. Pues el equilibrio no depende del nº exacto de partículas que estén en el lado izquierdo o derecho, sino de que el comportamiento de todas las partículas sea el mismo durante un cierto tiempo considerado como el tiempo en el que el sistema está en equilibrio. ✓ Al llegar al equilibrio no se mantiene constante esa cantidad, ya que en el equilibrio caracterizado en el punto anterior dijimos que en dicha situación, la diferencia $N_i - N_d$ no es cero sino que es un nº pequeño a comparación del nº total de partículas. ✓ Cuando el sistema está en equilibrio, el nº de partículas que se encuentran en el lado izquierdo de la caja se mantiene constante ya que todas las partículas están distribuidas uniformemente por todo el sistema en este caso la caja. ✓ No se mantiene constante el nº de partículas en el lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio, no obstante dicho nº oscilará en un valor relativamente próximo a la mitad del nº de partículas total. Por lo que dependiendo del grado de aproximación a utilizar puede considerarse equilibrio o no. ✓ Si, ya que al estar en equilibrio las dos mitades de la caja tienen el mismo nº de moléculas. El equilibrio consiste en la densidad de presión y temperatura; como está en una caja aislada la presión y temperatura se mantienen constante y para que la densidad se mantenga constante tiene que haber partículas repartidas iguales en cada lado del cajón. ✓ No, ya que como se mencionó en el ítem anterior, en el equilibrio tenemos en cuenta un período de tiempo.

		✓ El nº de partículas a cada lado del cuadrado no permanece constante, pero como se expresó en el apartado anterior, la diferencia $N_i - N_d$ presenta mínimas variaciones alrededor del cero, lo que no significa que no esté en equilibrio, sino que se “acomodó” alrededor de ese nº, en eso consiste el equilibrio ✓ El nº de discos en el lado izquierdo no se mantiene constante en el tiempo, pero cuando el nº de discos es muy grande se dice que está en equilibrio porque las posibilidades de que los discos se agrupen en una zona del recipiente son muy bajas ✓ No se mantiene constante la cantidad de partículas del lado izquierdo. Mientras la variable $N_i - N_d$ no cambie perceptiblemente durante un tiempo en que se realicen mediciones sobre el sistema, el mismo podrá considerarse en equilibrio. ✓ El hecho de que el sistema esté en equilibrio implica que la cantidad de partículas en el lado izquierdo se mantenga constante, sin embargo, no puede ser para cualquier nº constante, sino la mitad del total de partículas o, lo que es lo mismo, la misma cantidad que en el lado derecho de manera que la diferencia entre ambas sea cero.
I	Considere la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo de cada uno de los casos anteriores. Describa de modo cualitativo el comportamiento de $(N_i - N_d)$ en función del tiempo en el equilibrio. ¿qué indican las variaciones o fluctuaciones que se observan en la gráfica? ¿Cuál es el valor medio de $N_i - N_d$? ¿Ese valor medio varía o permanece constante en el tiempo?	✓ La gráfica de $N_i - N_d$ tiende a situarse en su punto de equilibrio al aumentar el nº de partículas. Estas variaciones son producto de que el nº de partículas no es suficientemente grande para alcanzar una distribución homogénea. El valor medio es 0 el cuál permanece constante en el tiempo ✓ La gráfica de la diferencia entre la cantidad de partículas del lado izquierdo y el lado derecho se mantiene oscilando en las cercanías del 0. Las variaciones o fluctuaciones que se observan en las gráficas nos advierten de que lo que consideramos equilibrio, no necesariamente se da con valores exactos, sino que ronda por ciertos valores. El valor medio de la diferencia, 0, permanece constante en el tiempo. ✓ $N_i - N_d$ fluctúa constantemente en el tiempo, llegando a alcanzar valores máximos cuando N es relativamente pequeño ($N \leq 10$) y alejándose su valor cada vez mas de los valores máximos a medida que N crece. Mayor es el nº de partículas, $N_i - N_d$ oscila entre números de valor absoluto más pequeños a $N/2$ y $N/2$ (en relación a N). Las variaciones que se observan en la gráfica indican que mientras mayor sea N mucho menores, en relación a

		$N_i - N_d$, serán los valores entre los que varíe $N_i - N_d$. El valor medio de $N_i - N_d$ es cero, el cuál va variando mientras pasa el tiempo. ✓ En dicha gráfica lo que se representa es cuál es el valor de la diferencia $N_i - N_d$ para distintos instantes de tiempo y de esta forma podemos deducir cuales son las cantidades de partículas que hay de cada lado. El valor medio aceptado en estas gráficas es un rango de números alrededor del valor 0 de la diferencia $N_i - N_d$, que se mantiene constante a través del tiempo ya que se espera que el sistema se comporte dentro de este rango, por lo menos luego de transcurrido un tiempo. ✓ El comportamiento cualitativo de la gráfica $N_i - N_d$ en función del tiempo en el equilibrio es cero ya que para todo tiempo la cantidad de partículas del lado izquierdo de la caja va a ser igual al nº de partículas del lado derecho de la misma. Las variaciones o fluctuaciones que se observan en las gráficas anteriores, indican que el sistema no está en equilibrio, es decir, que la cantidad de partículas que se encuentran ubicadas en el sector izquierdo de la caja varían a medida que transcurre el tiempo. El valor medio de $N_i - N_d$ es semejante a 0 y permanece constante. ✓ El comportamiento de $N_i - N_d$ en función del tiempo en el equilibrio “debería” permanecer constantemente en el valor cero, no obstante eso es improbable para todo tiempo. Las fluctuaciones indican que las partículas se mueven aleatoriamente e impredeciblemente. El valor medio de $N_i - N_d$ es aproximadamente cero. El cuál no permanece constante, sino que varía en función del tiempo con una amplitud relativa menor conforme aumente el nº de partículas. ✓ $N_i - N_d$ es la diferencia de moléculas en el lado izquierdo y derecho del recipiente. Cuando la gráfica se encuentra encima del cero quiere decir que en el lado izquierdo hay más moléculas, cuando la diferencia $N_i - N_d$ es cero quiere decir que el sistema está en equilibrio. Las variaciones que figuran en la gráfica indican la cantidad de bolitas que pertenecen al lado izquierdo como al lado derecho. El valor medio de $N_i - N_d$ es cero. El valor medio varía con el tiempo, o sea, tiene fluctuaciones. ✓ Las variaciones o fluctuaciones que se observan en la gráfica indican que para determinado momento las diferencias en el nº de partículas que hay entre la mitad izquierda y derecha. El valor medio entre $N_i - N_d$ se aproxima a cero a medida que N y t tienden a infinito. Este valor varía pero es muy pequeña su variación, por la cual la podríamos despreciar.
--	--	---

		✓ Cualitativamente, observamos que en el equilibrio, el estado varía alrededor de un valor medio, que es cero. Las fluctuaciones que aparecen son mínimas variaciones de estado, que tiende a acomodarse nuevamente. El valor medio de $N_i - N_d$ es cero y es constante en el tiempo. ✓ La variable $N_i - N_d$ en el equilibrio nos indica que los discos tratan de ocupar la totalidad del recipiente ya que su valor oscila alrededor de cero. Las fluctuaciones de dicha variable nos indican que el nº de discos en los diferentes lados del recipiente cambia con el tiempo. El valor medio de $N_i - N_d$ parecería ser cercano a cero y permanecer “casi “constante” en el tiempo. ✓ Cuando se alcanza un estado de equilibrio, el valor $N_i - N_d$ tiende a ser constante y próximo a cero, esto se debe a que el gas se va a ir expandiendo hasta ocupar todo el recinto. Lo que indican las variaciones son el comportamiento direccional de las partículas para ocupar todo el volumen disponible. ✓ Para los sistemas de mayor nº de partículas el valor medio de $N_i - N_d$ fluctúa cada vez menos y se aproxima al cero. En cambio para pocas partículas este valor varía enormemente. ✓ Las variaciones indican el valor que se obtiene, para un instante de tiempo, de la diferencia entre $N_i - N_d$. El valor medio es 0 de dicha diferencia y se hace más notorio al aumentar la cantidad de partículas. Ese valor medio es obtenido del promedio de todos los valores por cada instante de tiempo, por lo tanto, en un tiempo suficiente, tenderá a ser constante.
J	a) ¿Podría asociar N_i y N_d con alguna variable macroscópica, en el caso de que se tratara de las moléculas de un gas? ¿Cómo describiría el comportamiento de esa variable en el equilibrio?	✓ Si se puede asociar con una variable macroscópica pensando que dicho gas se distribuye homogéneamente en el recipiente. La distribución homogénea del gas se mantendrá constante cuando alcance el equilibrio. ✓ La variable macroscópica que podemos asociar con la distribución de las partículas es la presión. El comportamiento de esta variable en el equilibrio sería constante. ✓ Si, podría asociarlas al volumen. Imaginando un globo lleno de gas, puede verse que las partículas se distribuyen uniformemente en el globo, la diferencia $N_i - N_d$ es mínima comparada con N. El volumen en el equilibrio permanece constante. ✓ En el caso de que las partículas se trataran como las moléculas de un gas se podría asociar a N_i y a N_d con la variable macroscópica presión. Ésta sería provocada por el choque continuo de todas las

		moléculas contra las paredes de la caja. Si el sistema se encontrase en equilibrio, la presión se mantendría constante. ✓ Podríamos asociarla con la variable macroscópica temperatura en la que aumenta la probabilidad que las moléculas de dicho gas estén en el mismo valor (en promedio) conforme aumente el nº de moléculas. Luego en el equilibrio la temperatura de cada molécula de gas permanecerá constante teóricamente aunque experimentalmente sería aceptable que la diferencia de temperaturas sea relativamente pequeña. ✓ Si, la podríamos asociar con la variable macroscópica presión, en la cual para un período de tiempo existe la misma cantidad de partículas chocando contra a las paredes izquierda y derecha. De esta manera consideramos una sola presión y no una diferente para cada lado, ya que si existe una diferencia, la misma es despreciable. ✓ Podrían ser asociadas con la variable de estado llamada cantidad de sustancia, que en el equilibrio permanecería casi constante, variando poco alrededor de valor medio de equilibrio (es decir, a cada lado de la caja el nº de moléculas sería casi constante). ✓ N_i y N_d se puede relacionar con la variable macroscópica densidad (partículas por unidad de volumen). Esta variable no permanece constante en el tiempo ya que los discos se mueven libremente. ✓ Dado que N_i y N_d son partículas en movimiento, a ellas se les puede asociar una energía cinética, que está implicada en la temperatura termodinámica. ✓ Se podría pensar como variable la temperatura, para el equilibrio, ambas mediciones tendrían que ser iguales, aunque podrían variar de valor pero siempre de igual manera en ambas mediciones. 3 grupos no responden.
K	a) ¿Considera que las variaciones o fluctuaciones son perceptibles o podrían detectarse a través de algún instrumento? ¿Cambia su respuesta en función del número de moléculas N utilizadas en el modelo? Explique.	✓ En el caso de un gas pensamos que el nº de moléculas tiende a una cantidad excesivamente grande por lo tanto podríamos considerar que las fluctuaciones son imperceptibles, en el caso de que N sea pequeño no podemos afirmar lo anterior y habrá fluctuaciones. ✓ No. Como tratamos con moléculas, los cambios en sistemas tan pequeños y a las velocidades que estas se mueven, serían imperceptibles para cualquier instrumento de medición. Aún más, si el nº de partículas es elevadamente mayor, como en los casos

		reales, las variables macroscópicas permanecerán constantes en el tiempo. ✓ No sé qué instrumento podría medir las fluctuaciones pero mientras mayor sea N esta medición sería más difícil, por lo que se necesitaría un instrumento más sensible. ✓ Es muy probable que para un nº pequeño N de partículas, sea factible poder percibir las fluctuaciones y variaciones de las partículas. Pero para números muy grandes, esta tarea comienza a volverse difícil ya que si son muchas partículas hay muchos estados de distribución y por ende más fluctuaciones y variaciones. Tendrían que usarse instrumentos muy complejos que pudiesen contemplar todos estos estados y poderlos analizar y ver cómo evolucionan para luego poder volcarlos en una gráfica y así poder usar dicha información. ✓ Se puede considerar que las variaciones o fluctuaciones son perceptibles y podrían detectarse a través de algún instrumento si es que el nº de partículas que se encuentran en el sistema es relativamente bajo. A medida que se aumenta la cantidad de partículas, las variaciones y/o fluctuaciones se van haciendo más imperceptibles. ✓ Consideramos que las variaciones de cada una de las moléculas son imperceptibles e inmedibles ya que no existe instrumento de medición tal que permita detectar ese tipo de variaciones, no obstante midiendo la temperatura de un recipiente lleno de un nº relativamente grande de moléculas de gas estadísticamente puede estimarse la temperatura de las moléculas. Este razonamiento es válido siempre que el nº de partículas sea relativamente grande; suposición que es totalmente válida y lógica ya que un mol de gas posee $6,22 \cdot 10^{23}$ partículas y que solo representa dos gramos de hidrógeno. Por este hecho podría concluirse que en cualquier recipiente con gas, la temperatura puede suponerse uniforme en cada una de las partículas. ✓ Cuando las moléculas son pocas es posible detectarse con un instrumento, si hay muchas moléculas las variaciones son perceptibles. ✓ No. No existe instrumento que pueda contabilizar la cantidad de partículas con sus respectivas posiciones y velocidades en todo instante de tiempo. ✓ En mi opinión, con cualquier nº de moléculas, en el equilibrio,
--	--	---

		estas variaciones sería imperceptibles. ✓ Cuanto mayor sea la cantidad de moléculas en el recipiente más constante parecerá ser las variables macroscópicas del sistema. Como está relacionado con la temperatura, esta misma es una variable que se puede medir, pero si las fluctuaciones son dentro de un valor cercano al estado de equilibrio, estas variaciones no serán notadas por el instrumento. Si N aumenta el proceso se vuelve más rápido por lo que se alcanzaría un estado de equilibrio de forma rápida. ✓ Para poder decir si son perceptibles o será necesario un instrumento, dependerá de los saltos de temperatura que mediremos, si nos referimos a unos pocos grados, se necesitará instrumentos, mientras que si el salto es mayor, por ejemplo, 10 grados, notaremos nosotros mismos la diferencia al exponernos, sin embargo para saber una cantidad cuantitativa de temperatura será siempre necesario la utilización de aparatos de medición. ✓ No responde
L	Considerando los casos analizados en la simulación, diría Ud. que los procesos observados son irreversibles? Depende su respuesta del valor de N considerado? Explicar.	✓ Si, es un proceso irreversible ya que nunca más las partículas volverán a su estado inicial (todas a la izquierda) pero esta situación puede observarse para un nº N suficientemente grande. Lo contrario, ocurre en el caso de 23 partículas que en un determinado instante, después de transcurrido un tiempo, se podían visualizar en la misma posición original. ✓ En todos los casos, más pronunciado a mayor nº de partículas, el estado inicial en el que todas las partículas se encontraban a la izquierda del recipiente, nunca retomaron esa misma configuración, dando la idea de irreversibilidad de proceso, llevado por el equilibrio. ✓ En los casos en que N es menor es más probable que las partículas se vuelvan a encontrar en una de las dos mitades del recipiente, por ejemplo cuando $N = 4$, por lo que se puede considerar “menos irreversible” que cuando N es grande. De todos formas ésta es una situación instantánea; las partículas no dejan de moverse tendiendo a ocupar todo el recipiente, por lo que si considero que son procesos irreversibles. ✓ La irreversibilidad de un proceso tiene que ver con el nº de partículas intervinientes en los procesos analizados en esta simulación vemos que cuando intervienen pocas partículas como el caso 2 o 4 el proceso no podría considerarse irreversible, ya que hay instantes en los que todas las partículas se encuentran de

		un solo lado de la caja. Pero si sería correcto decir que el proceso es irreversible para los sistemas con 10, 20 , 60 y 90 partículas porque para sistemas con una alta cantidad de partículas se vuelve casi imposible que estas vuelvan a concentrarse todas en un sector. ✓ Considerando los casos analizados en la simulación, se puede decir que los procesos observados son irreversibles, sin importar el valor de N utilizados; ya que en la naturaleza, no existe un proceso que sea reversible. ✓ Es muy poco probable que las partículas vuelvan a su estado inicial ya que la mayor cantidad de microestados está caracterizado por la misma cantidad de partículas de cada lado. La reversibilidad depende de los microestados, es decir depende indirectamente de N, ya que los microestados dependen de N, porque a mayor cantidad de partículas mayor nº de microestados. ✓ Los procesos son irreversibles ya que una vez que las partículas se han dispersado, es muy poco probable que regresen a su estado inicial. Si, depende de N, ya que para N pequeños la probabilidad de volver al estado inicial son más altas que para un N mayor. ✓ Podríamos decir que existe, tomando en cuenta solamente la variable cantidad de partículas a cada lado de la caja y teniendo solamente dos partículas, cierta reversibilidad, ya que en algunos momentos las dos partículas vuelve a estar del lado izquierdo de la caja, pero ocupando espacios distintos a los iniciales. Lo que observo a mayor nº de partículas es que las partículas siempre están repartidas en toda la caja, por lo que la reversibilidad del sistema es inexistente. ✓ En un proceso irreversible no se vuelve al estado inicial con el paso del tiempo, por lo tanto los sistemas analizados con pocos discos no se pueden considerar irreversibles ya que en determinados instantes el sistema vuelve a tener todos los discos concentrados en el lado izquierdo. Para que un proceso sea irreversible el sistema debe tener un nº grande de grados de libertad, es decir, un nº grande de discos que se muevan libremente por el recipiente. ✓ En las experiencias realizadas se ve que puede ser reversible, por ejemplo en el 1er caso, puede darse que estén las 2 partículas en el lado izquierdo, que las 2 estén en el derecho y una en cada lado repitiéndose esas situaciones en el tiempo. Cuando se va aumentando la cantidad de partículas, esto se vuelve menos
--	--	--

		probable y de esa forma podríamos llegar a decir que con un nº importante de partículas, el proceso es irreversible, tiende a ocupar todo el volumen y no vuelve después a ocupar una mitad. ✓ Los procesos parecen ser más fáciles de ser reversibles para valores pequeños de N. ✓ Por ejemplo, es más probable que 2 partículas vuelvan a ocupar el lado izquierdo (primera gráfica) que si el valor de N es mucho mayor. Los procesos observados son irreversibles a partir de $N = 20$, en los anteriores podemos observar que en algún punto han vuelto a estar todos como en la condición inicial pero sin mantenerse estable.
	TP Nº 3 TIRADA DE MONEDAS	
LL	Explorando la Simulación. b). Capture las imágenes para los casos de 20 y para 1000 monedas. En ambos casos corra las simulaciones a razón de 1 flip por step y tome las imágenes cuando se hayan transcurrido 200 flips. Analice las gráficas obtenidas y explique cualitativamente las diferencias que observa entre los dos casos considerados. ¿A qué atribuye Ud. las diferencias observadas?	✓ La principal diferencia que podemos observar es que para el caso de 20 monedas se llega al equilibrio mientras que para 1000 monedas no. Así como también la entropía alcanza su pico variando un poco en torno a ese valor, en cambio en el segundo caso fue creciendo de manera constante. ✓ La diferencia entre los gráficos se debe a la cantidad de tiradas respecto a la cantidad de monedas. En el segundo caso 200 tiradas para 1000 monedas resultaron ser poco por lo que las gráficas parecen ser similares al inicio de los gráficos para el caso de las 20 monedas. ✓ Se ve que con menos monedas, la entropía tiene un cambio brusco de valor y luego se establece y con mayor cantidad de monedas la variación es más suave. ✓ La diferencia más notable es que en el caso de 20 monedas se observa que el sistema empieza a fluctuar alrededor de las 10 caras y en el caso de 1000 el sistema sigue evolucionando. Esta diferencia es causada por la gran diferencia de monedas que forman los sistemas. ✓ Se observa que en el caso de 1000 monedas parecería que no se llegó al equilibrio, si se llegó en el caso de 20 monedas. Esto sucede al ser mucho mayor la cantidad de monedas en el segundo caso observado. ✓ Lo que observamos es que con N pequeño la fluctuación es mayor que con N grandes y también equilibrio se logra antes. ✓ La diferencia que se ven son que para el caso de las 20 monedas el sistema alcanza el equilibrio. Cosa que no ocurre con el de mil

		monedas. ✓ Observamos que en la gráfica de entropía a mayor cantidad de monedas presenta menos fluctuaciones, es más uniforme. En la gráfica del histograma vemos que el nº de veces que se obtienen caras hacia arriba es mayor cuando hay mayor cantidad de monedas. El promedio del nº de caras hacia arriba se encuentra entre 20 y 30 caras. En la tercera gráfica se encuentra reflejado el movimiento de las caras y las cruces. ✓ La diferencia que pudimos apreciar entre los dos casos es que en el sistema de 20 monedas el equilibrio se alcanza, cosa que no ocurre en el sistema de las mil monedas. Atribuimos esto a que en el sistema de mil monedas los 200 flips o vueltas son insuficientes para que pueda alcanzarlo. ✓ De la observación de las gráficas de ambas situaciones podemos notar que la cantidad de monedas en cara y en cruz logran una paridad en un nº menor de pasos cuando se analizan 20 monedas. Esto se debe a que cuando se comienza la simulación, las monedas pasarán de cara a cruz, por el simple hecho de que hay más monedas en cara. Pero al ser pocas monedas, rápidamente la cantidad de monedas en cara y en cruz se emparejará y ahí comenzarán a verse variaciones alrededor de ese equilibrio. Lo que sucede en el sistema con 1000 monedas, es lo mismo que en el de 20, si vemos la gráfica de las cantidades de monedas en cara y el cruz, vemos que la monedas en cara atraviesan un continuo descenso. No llegamos a ver esas variaciones cerca de ese equilibrio solamente porque 200 pasos son muy pocos para lograr emparejar 1000 monedas y por ende, no llegan a equilibrarse. ✓ 20 MONEDAS: el sistema llega al equilibrio en menos de 200 pasos (aprox en 100 pasos) pero tiene un considerable número de fluctuaciones comparado con el nº de monedas que hay. 1000 MONEDAS: A diferencia del anterior este no llega al equilibrio en 200 pasos, lo hace entre los 1200 y 1400, pero tiene un nº mínimo de fluctuaciones comparado con la cantidad de monedas que hay. Las diferencias se deben a que la cantidad de monedas es los dos casos es considerablemente diferente. ✓ Al comparar ambas gráficas vemos que la entropía de este sistema de 20 monedas llega con mayor rapidez a un valor constante , a diferencia del sistema de 1000 monedas, cuya
--	--	---

		evolución es más lenta. Las diferencias visibles en las gráficas, suponemos que están dadas a que en un sistema menor, un solo cambio de valor de nuestra variable “cara o cruz” afecta más a la totalidad del sistema que si ese mismo cambio ocurriera en un sistema 50 veces mayor. ✓ Se observa que en el primer sistema al poseer un bajo nº de monedas alcanza el equilibrio rápidamente; en cambio, el segundo caso, el sistema aún no ha llegado a su estado de equilibrio; ambos casos son aproximadamente 200 flips realizados. Estas diferencias se atribuyen al nº de monedas utilizadas.
M	a) Considere el caso de 1000 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio?	✓ El criterio que se utilizó para determinar cuando el sistema alcanza el equilibrio es cuando el valor de 500 o pequeñas variaciones de ellos. ✓ El criterio para determinar cuando el sistema alcanzó el equilibrio fue que el nº de caras sea similar al de cruces. ✓ Considero que a partir de 500 se ve que la entropía tiene menos variaciones, por lo tanto podría considerar al sistema en equilibrio. ✓ Utilizamos la gráfica de entropía para decidir cuando el sistema está en equilibrio ya que la curva se hace asintótica a un valor de entropía, lo cual nos indica que el sistema se encuentra en los estados más probables por lo tanto en equilibrio. ✓ El criterio fue observar que la cantidad de caras en las monedas sea aproximadamente igual a la de cruces a lo largo del tiempo. ✓ Hemos utilizado el criterio de que el equilibrio se alcanza cuando las fluctuaciones son mínimas. ✓ El criterio que se utilizó fue observar la gráfica de entropía en donde se ve que después de una cantidad de flips la gráfica es casi constante, o sea el sistema está en equilibrio. ✓ El criterio (1000 monedas) que utilizamos es ver cuando la gráfica de entropía tiende a ser más constante, presentando pocas fluctuaciones. ✓ El criterio que se utilizó para determinar que el sistema ha alcanzado el equilibrio es ver que la gráfica de la entropía, después de cierta cantidad de flips, comienza a mantenerse prácticamente constante. Se puede decir que en ese momento el

		sistema alcanzó el equilibrio. ✓ El criterio utilizado para considerar que el sistema se encuentra en el equilibrio fue analizar la gráfica de monedas en cara y en cruz, y cuando esta se mantuvo constante (constante en un cierto rango de variaciones) fue cuando se decidió cortar con la simulación. Otro hecho que avaló esta decisión, fue que ese rango de variaciones se encontraba muy cerca del 500, o sea 500 monedas en cara y 500 en cruz. ✓ Para determinar el equilibrio tuve en cuenta que la entropía haya llegado a su máximo y permanezca constante y que la cantidad de caras y cruces se iguale (viendo la gráfica correspondiente) ✓ El criterio utilizado para determinar que en este instante el sistema esté en equilibrio es ver que la cantidad de “caras” sea próxima a las “cruces” y que permanezca razonablemente invariable en el tiempo. ✓ Determinamos que el sistema alcanzó el equilibrio cuando en la gráfica de las monedas observamos que ambas tienden a un valor medio, es decir quedan aproximadas las cantidades de monedas azules y rojas a la vista y además cuando la curva de entropía se hace constante.
N	b) Considere el caso de 10 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio?	✓ Se utilizó el mismo criterio, la diferencia es que se necesita mucha menos cantidad de flips para llegar al mismo. ✓ El criterio para determinar cuándo el sistema alcanzó el equilibrio fue que el nº de caras sea lo más similar al de cruces posibles. ✓ La entropía sufre menos cambios a partir de la tirada 450 en esa etapa podría considerarse en equilibrio. ✓ El criterio que utilizamos para considerar que el sistema está en equilibrio es el mismo que en el caso anterior pero como las fluctuaciones en la cantidad de caras es apreciable por las pocas monedas del sistema no se ve un comportamiento asintótico de la curva de entropía. ✓ En este caso se llegó al equilibrio más rápidamente ya que el nº de monedas es bastante menor. De nuevo, se esperó a que haya igual cantidad de caras que de cruces. ✓ El valor que toma es 0,5. Si, podemos considerarlo constante ya que las fluctuaciones son pequeñas. ✓ El criterio que se utilizó es observar la primera gráfica y se dice

		que está en equilibrio en las intersecciones de ambas líneas (rojas y azules). No se utilizó el método anterior porque como se ve la gráfica de la entropía no se hace constante. ✓ Para esta simulación (10 monedas) también hemos tenido en cuenta cuando la gráfica de entropía se mantiene cercana a constante con poca cantidad de fluctuaciones. ✓ En este caso no se pudo utilizar el mismo criterio que en el ítem anterior para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio. Si bien podría ser el mismo, no es preferible ya que la gráfica de entropía presenta muchas fluctuaciones. Es mejor mirar la gráfica de las monedas y considerar que el equilibrio se alcanza en el momento en que se cruzan la línea azul con la roja, ya que después de ese momento la gráfica es muy irregular pero siempre tiende a volver al mismo valor central. ✓ Para el caso de 10 monedas es más difícil observar un equilibrio al respecto de las cantidades en cara y en cruz, las pequeñas variaciones en dichas cantidades, tienen gran incidencia en el total. Por ejemplo, para el caso de las 1000 monedas, tener 501 monedas en cara y 499 en cruz, es casi imperceptible en la gráfica ya que esta diferencia es insignificante comparado con el nº de monedas participantes. Ahora bien, si tenemos 10 monedas y 6 están en cara y 4 en cruz, por más de que sea una pequeña diferencia alrededor del valor medio, la diferencia representa un 20% del total y se nota en la gráfica. Por este motivo es que para sistemas con pocos números de monedas es más difícil observar su equilibrio. ✓ Para determinar el equilibrio usé el mismo criterio que para el caso de 1000 monedas, pero aquí las fluctuaciones son más importantes ya que el nº de monedas es mucho menor. En determinados momentos la entropía pasa de estar en su valor máximo a valores menores y luego vuelve al máximo. ✓ Caso para 10 monedas: El criterio utilizado para determinar el momento en que el sistema ha llegado al equilibrio fue el mismo que se empleó para el caso de las 1000 monedas, a diferencia que, como ya lo indicamos anteriormente, este “sistemita” logra el equilibrio con mayor rapidez. ✓ Utilizamos el mismo criterio que para el apartado (a)
o	c) ¿Qué valor toma, en el equilibrio, la variable “número de caras”	✓ Para el caso b, en el equilibrio, 5 mientras que en heads = 500. En b dicho no puede ser considerado constante ya que ± 1 al número de caras representa una fluctuación importante porque la

para los casos considerados en (a) y en (b)? ¿Puede dicho valor considerarse constante, o presenta fluctuaciones? Explique.	cantidad total de monedas es diez. No ocurre lo mismo en a, donde tenemos 1000 monedas y, una vez en equilibrio, se ve afectado por la misma variación de ± 1, sin superar las heads = (500 ± 20). Es por eso que dicho valor puede ser considerado constante, además de ser respaldado por la gráfica de entropía. ✓ Para el caso de 1000 monedas el nº de caras, en el equilibrio, se aproxima a 500 y para las 10 monedas, a 5. La variable nº de caras no es una constante, pero para grandes cantidades de monedas se la puede considerar como tal ya que las fluctuaciones son menores en relación a la cantidad total. ✓ En el caso de 1000 monedas toma el valor 500 y en el de 10 monedas, adopta el valor 450. Si bien la entropía a partir de esos valores es menor la razón de cambio respecto a la cantidad nº de caras, por tal motivo podría considerarse constante. ✓ Los valores que toman las variables cantidad de caras no se puede considerar constante ya que muestran fluctuaciones entre los macroestados de mayor probabilidad. ✓ Toma aproximadamente el nº total de monedas dividido por dos y es un valor que fluctúa a lo largo del tiempo, pero con menores fluctuaciones a medida que hay una mayor cantidad de monedas. ✓ Para el caso de las 1000 alcanza el equilibrio en 1600 flips y en el caso de 10 monedas llega al equilibrio en 5 flips. En ambos casos presentan fluctuaciones en el valor de equilibrio pero para el caso de 1000 monedas es menos notable que para el caso de 10 monedas. ✓ La variable número de caras en el equilibrio tiende a un valor que se encuentra entre 20 y 30 y en este intervalo presenta fluctuaciones. El mayor nº de ocurrencias tiende a encontrarse en ese intervalo, el promedio se encontrará cercano a 25. ✓ En el sistema de 10 monedas el valor que se alcanza en el equilibrio es 5 y en el sistema de 1000, son 500. En ambos casos se presentan fluctuaciones, pero son más notables en los sistemas con menos monedas. Esto se debe porque las posibilidades de que el valor central o de equilibrio se mantenga constante son mayores en los sistemas de más cantidad de monedas. Es decir, cuantas más monedas haya, el valor central o de equilibrio tiende a ser constante.
--	--

		✓ Para el caso (a) el valor de monedas en cara en el equilibrio en el momento que paramos la simulación es de 523 y para el caso (b) es 5. Estos valores no son constantes, sino que van a sufrir fluctuaciones y variaciones a media que se realizan más “pasos”. Lo que es de esperar que se mantenga constante, es el rango en donde se van a mover estas variaciones. ✓ En (a) “número de caras” en el equilibrio toma el valor 500 y en (b) el valor 5. Estos valores no son constantes pues existen fluctuaciones pero siempre tienden a volver a dichos valores. ✓ La variable “number of heads” toma el valor máximo de 500 caras para el caso de las 1000 monedas y 6 para el de las 10 monedas. Dependiendo de qué caso lo podemos considerar constante. Como hemos dicho con anterioridad, en el caso del gran sistema de 1000 monedas, un cambio en una moneda no modifica la media del sistema entero, por eso, a este lo podemos considerar constante. Para el más pequeño, vemos que no es así, que no permanece en equilibrio constante. En los dos casos el valor que toma en el equilibrio es aproximado la mitad de las monedas puestas en juego, en el caso a) 500 y en el caso b) 5. Presenta fluctuaciones, éstas son de mayor magnitud cuando la cantidad de monedas es baja, suponemos que los consideraríamos constante para un nº muy elevado de monedas.
P	Entropía a) Las gráficas de abajo representan la entropía del sistema para 20 monedas y 2000monedas respectivamente. Como puede verse, son muy diferentes. Intente explicar por qué se dan esas diferencias.	✓ Esta diferencia tiene que ver a que la entropía tiene una relación directa con la multiplicidad del sistema en equilibrio, por lo tanto $S_{20} = 12$ se ve afectada por la fluctuación en torno a heads= 5 donde es notoria la diferencia de multiplicidad para valores cercanos como 3 o 7, así como también son su relación de la poca cantidad de monedas involucradas. ✓ Se da esa diferencia porque al ser mayor la cantidad de monedas y a muchas tiradas, la cantidad de caras y cruces se hacen similares y constantes y el sistema entra en equilibrio ✓ Dado que la entropía está relacionada con la cantidad de macroestados en el sistema de 20 monedas, al tener un menor nº de partículas alcanza su punto de equilibrio prontamente teniendo un cambio brusco de entropía caso contrario para 2000 monedas , que demora más en alcanzar el equilibrio pero lo hace de una forma más suave. ✓ Las diferencias entre las gráficas son causa de la gran diferencia de monedas que hay entre los sistemas. El sistema con pocas monedas muestra fluctuaciones considerables en relación con la cantidad de monedas total por la escasa cantidad de

		macroestados disponibles. Lo que no se ve en el sistema de 2000 monedas. ✓ En el caso de tener 20 monedas es más probable que haya un gran desequilibrio entre las caras y las cruces, cosa que es muy poco probable que ocurra si tenemos 2000 monedas. Por ende la gráfica de entropía presenta esas abruptas disminuciones cuando tenemos 20 monedas en los momentos en los cuales es muy grande la diferencia entre las caras y las cruces. ✓ La diferencia es que la primer gráfica llega al valor máximo antes que la segunda, pero con más fluctuaciones. Mientras que la segunda tarda más en alcanzar dicho valor, pero éste es más estable. ✓ Se observa que el sistema de 20 monedas llega más rápido al equilibrio, cosa que tarda mas en el sistema de 200 monedas. En el de 20 monedas se necesita menos de 20 flips para llegar al equilibrio, la de 200 por arriba de 2000 flips. Por lo tanto en la primera gráfica se muestra el sistema en equilibrio ya que la evolución es casi despreciable, en la segunda gráfica se nota la evolución del sistema hasta llegar al equilibrio. También se puede observar que en el caso de 20 monedas las fluctuaciones son mucho más notorias que en el caso de 2000 monedas. ✓ Gráfica simulación de 20 y 2000 monedas. Las diferencias que se observan vienen dadas por la cantidad de monedas, ya que al tener más unidades tengo más cantidad de microestados posibles, lo que hace cada vez menos probable la posibilidad de volver al estado inicial. La gráfica de las 20 monedas presenta fluctuaciones más notorias que las de la gráfica de las 2000 monedas, por lo tanto va a ser menos irreversible. ✓ En la gráfica del sistema de 20 monedas se llega con mucha más velocidad al valor constante o de equilibrio que en la gráfica del sistema de 2000 monedas. Esto ocurre de la siguiente manera: al inicio todas las monedas están en su cara roja y se van rotando aleatoriamente hacia su cara azul, una por una, hasta llegar a un punto en que las caras sean la mitad roja y la otra mitad azul; después de ese momento el sistema siempre va a tender a lo mismo, esa situación es el equilibrio del sistema. Por lo tanto en ese momento la entropía llega a su valor constante. Mientras menos monedas sean, el sistema llega al equilibrio con menos cantidad de flips. Eso explica porque la entropía en la gráfica del sistema de 2000 monedas necesita muchos más flips para llegar al valor constante.
--	--	--

		Otro aspecto a observar es el hecho de que en la gráfica de la entropía del sistema de 20 monedas se presentan más fluctuaciones que en el sistema de 2000. Esto sucede porque en los sistemas con pocas monedas el equilibrio se alcanza y de a momentos las monedas coinciden en caer todas o casi todas con caras del mismo color y el equilibrio se pierde por un instante pero luego se recupera nuevamente. En ese momento en que el equilibrio se pierde se produce la fluctuación en la gráfica de entropía. Por esto en la gráfica de entropía del sistema de 2000 monedas no se presentan prácticamente nada de fluctuaciones. ✓ Estas diferencias se deben a que para un caso la cantidad de monedas es 20 y para el otro es 2000 (dos órdenes de magnitud de diferencia). Mientras mayor sea N más son los pasos necesarios para que el sistema llegue al equilibrio. Mientras menor sea N más probabilidades de que ocurran fluctuaciones tiene el sistema y esta probabilidad decrece cuando N se hace muy grande. ✓ Para el caso de las 20 monedas la entropía llegó a un valor máximo que no se mantuvo constante, tanto como en el sistema de 2000 monedas. Ya a partir de 100 monedas, la entropía puede considerarse constante, las pequeñas fluctuaciones no alteran la suma total del sistema. Esto se debe a la cantidad de monedas, para 20 monedas se nota que alcanza rápidamente el equilibrio no sucede así con 2000 monedas. A simple vista parece que la curva de la izquierda es bastante irregular, pero esto sólo se debe a la escala utilizada.
Q	b) Cuando consideramos sistemas reales, sabemos que, cuando el sistema está aislado, su entropía crece hasta alcanzar un valor estable máximo. En el caso de la tirada de monedas, ¿es válida esta afirmación en los sistemas de pocas monedas? A partir de qué número de monedas podemos considerar que se produce esa tendencia?	✓ La afirmación no es válida para sistemas con pocas monedas. Podríamos decir que a partir de 100 monedas la entropía comienza a mantenerse constante. ✓ A partir de las 100 monedas se podría producir que la entropía alcance un valor constante ✓ No es válida la afirmación para pocas monedas, porque una vez que alcanza el equilibrio sufre fluctuaciones importantes. A partir de las 800 monedas aproximadamente visto de forma experimental son el software. ✓ Para los casos de pocas monedas no es válida la afirmación ya que por la gráfica se puede ver que no tiende a ningún n° fijo. A partir de las 1000 monedas ya se puede ver un comportamiento asintótico lo que nos indica la tendencia a un n°. ✓ En los sistemas con pocas monedas la afirmación no es válida. Después de varios intentos, en mi opinión a partir de 100

		monedas las fluctuaciones de entropía son mínimas. ✓ No es válida, ya que el valor máximo no es estable. A partir de $N = 100$ podemos notar que se produce esta tendencia. ✓ No es válida la afirmación, ya que al observar las gráficas (de entropía) de 20 monedas se nota mucha irregularidad, o sea, hay muchas fluctuaciones. Se produce esa tendencia a partir de las 1000 monedas aproximadamente. ✓ No es válida, pues para un sistema con pocas monedas la entropía presenta demasiadas fluctuaciones y muy pronunciadas y no se acerca a una constante. Estuvimos observando y podríamos decir que a partir de un nº cercano a 100 monedas podemos considerar que se produce la tendencia a un valor estable máximo como se puede ver en la gráfica de 100 monedas. ✓ Esta afirmación no es válida para un sistema de pocas monedas, porque en la gráfica de su entropía se van a presentar fluctuaciones, no un valor máximo estable, y esto ocurre por lo explicado en el ítem anterior. Por lo visto en las gráficas presentadas en las consignas podemos decir que al menos necesitamos 2000 monedas para que la afirmación sea válida. ✓ Esta afirmación no es válida para los sistemas de pocas monedas pues la entropía no se mantiene estable una vez que alcanza su valor máximo, este puede bajar para luego volver a subir a su valor máximo y repetir este proceso indefinidamente. No es válida la afirmación para el caso de pocas monedas, podríamos considerarlo constante a partir de un nº muy elevado, es decir cuando tiende al infinito.
R	Relación entre la tirada de monedas y las partículas en una caja Compare la simulación “Tirada de monedas” con la realizada en la actividad 2 que corresponde a las partículas en una caja. ¿En que sentido se las puede considerar semejantes? Explique	✓ Si comparamos la tirada de monedas con las partículas en una caja podemos decir que son semejantes en el sentido que para bajo nº, la entropía nunca será constante ya que las fluctuaciones son muy grandes, pero a medida que aumenta la cantidad de monedas o partículas la entropía de ambos se hace más estable y por lo tanto constante. ✓ En la caja, cuando se tiene un nº de partículas grande, después de un tiempo la diferencia $N_i - N_d$ se mantenía constante y su valor promedio era 0, analizado esto se había sacado la conclusión que el sistema está en equilibrio por lo tanto su entropía alcanzó un valor constante, este suceso es comparable con la experiencia de las monedas, en la cual se ve que la entropía luego de un dado intervalo de tiradas de monedas, la entropía se mantiene constante (también ocurre

	que entra en equilibrio de forma constante con un gran nº de partículas). ✓ La analogía que existe entre el experimento de la caja y el de la tirada de monedas, es que ambos analizan la posición de las partículas con respecto a la caja, en la tirada de monedas, inicialmente tenemos todas caras, y luego el sistema evoluciona en el tiempo hacia el equilibrio, donde tenemos aproximadamente mitad caras y mitad cruces, que análogamente significa mitad de partículas a cada lado de la caja. ✓ Se las puede considerar semejantes en el sentido de que existen dos estados posibles: cara o cruz para la actividad de la moneda y mitad derecha o izquierda para el caso de las moléculas el gas en una caja. ✓ Las similitudes de ambos casos son que a mayor nº de moléculas o de monedas, las gráficas son menos irregulares, o sea presentan menos fluctuaciones al llegar al equilibrio. Por lo tanto para el caso de menos moléculas o monedas, llegan más rápido al equilibrio, pero con mayores fluctuaciones. ✓ En ambas simulaciones sucede que a mayor cantidad de elementos (monedas y partículas) la posibilidad de volver al momento inicial se va haciendo cada vez menor, es más irreversible. ✓ La semejanza que hay entre las dos simulaciones, “tirada de monedas” con la realizada en la actividad 2, es que a medida que se aumentan la cantidad de partículas, ya sean monedas o moléculas, el sistema va a llegar a un equilibrio que presenta menos fluctuaciones, que otro que posee una menor cantidad de partículas. ✓ Yo creo que la principal semejanza que las relaciona es que, para una molécula de gas solo había 2 estado posibles, estar a la izquierda o a la derecha de la caja. Y aquí, cada moneda puede estar también en dos estados solamente, en cara o cruz. La evolución de los sistemas se miden en ambos casos, en una variable determinada, en el caso del gas se mide a través del tiempo mientras que acá se mide en pasos. Y también podemos ver situaciones semejantes, por ejemplo: cuando teníamos muchas moléculas de gas veíamos que se volvía un proceso “irreversible”. Con el sistema de las monedas pasa algo similar, para cantidades muy grandes se
--	--

		vuelve muy poco probable que todas vuelvan a estar en cara de nuevo. ✓ En la simulación “tirada de monedas” es más sencillo ver que el sistema llega al equilibrio (viendo las gráficas). También en ese caso es más fácil notar la disminución de las fluctuaciones cuando el sistema alcanza el equilibrio. Se las puede considerar semejantes en el sentido que las dos evolucionan hasta llegar al estado de equilibrio y no vuelven al estado inicial (para valores apropiados de N), es decir que son irreversibles. ✓ La tirada de monedas y la actividad 2 de las partículas en la caja se asemejan por el análisis en particular que le realizamos: en ambos casos son variables con 2 valores posibles: o es cara o es cruz o está del lado derecho, o está del lado izquierdo. Y en ambos casos arrancaron en una condición inicial particular: todas las partículas se encuentran en el lado izquierdo de la caja o todas son “caras”. Evolucionan, aumentando su entropía, hacia un estado de equilibrio en que el nº de partículas se iguala de cada lado, o el nº de caras es igual al de cruces. Y en ambos casos vimos que ningún sistema retornó al estado original. ✓ Lo consideramos semejantes por la característica que ambos sistemas alcanzan su equilibrio cuando se equiparan las cantidades en el primer caso se ubicaban uniformemente las partículas de cada lado y en el segundo caso quedaban visibles la misma cantidad de monedas rojas y azules. También notamos que alcanzan su equilibrio de manera más uniforme cuando aumenta el nº de partículas en el primer caso y moneda en el segundo.
	TP Nº 4 MULTIPLICIDAD	
S	a) Trabajando con 4 partículas y una energía total igual a 8, analice todas las configuraciones posibles; el número de microestados correspondientes a cada configuración y complete la siguiente tabla: En cada caso capturar las imágenes	✓ En esta primera gráfica se puede ver claramente los 5 macroestados posibles para la distribución de 8 unidades de energía entre las partículas. Para el primer macroestado nos encontramos con 4 microestados posibles, en la cual la distribución de la energía es una mínima cantidad para la mayoría de las partículas y el máximo posible en una sola. En esta segunda configuración tenemos 12 microestados posibles, con la mayor parte de las partículas con un nivel bajo de energía entre 1e y 2e y tan solo una con 4e En la siguiente configuración, como en la anterior, tenemos 12 microestados posibles, donde las partículas están con niveles de energía ya más próximos entre sí.

	que correspondan; insertarlas en la hoja y discutir la distribución	En este modo de distribución de la energía tenemos 6 microestados posibles y se puede ver que si los niveles de energía se encuentran saltados entre quienes tienen la mínima energía y la máxima. Para el macroestado en el cual todos tienen el mismo nivel de energía encontramos sólo un microestado posible ya que la suma en este caso de partículas con igual carga debe ser constante. ✓ Estas imágenes representan la energía total elegida (en este caso 8) con la combinación de 4 partículas distintas. De acuerdo a cada configuración (en este caso se pueden hacer 5) las partículas se reordenan de modo que las combinaciones formen una energía total igual a 8. Se puede observar que para II y III hay mayor número de microestados, o sea, mas combinaciones posibles. ✓ Los macroestados nº II y III son los más probables, dado que son los que más cantidad de microestados tienen. ✓ Se observa que hay dos macroestados que se pueden configurar de 12 maneras diferentes por lo cual serán los de mayor probabilidad. ✓ Para esta configuración donde tenemos 4 partículas y la energía total es 8, de las configuraciones posibles, las más probables son la II y la III, son las de mayor cantidad de microestados ✓ Los demás hacen lo pedido pero sin discutir; sin comentar
T	a) El applet sólo muestra hasta un máximo de cinco partículas y energía igual a 11. Capturar las imágenes para esa distribución y analizar los resultados obtenidos. Calcular Ω.	✓ Calculan Ω. Para 5 partículas y 11 unidades de energía para distribuir se distingue en macroestado VI donde las posibilidades de que esta configuración son de casi la tercera parte de los 190 microestados posibles. En este macroestado hay una distribución de energía tal que ninguna de las partículas tiene un nivel de energía muy superior al resto, ni tampoco lo contrario, sino que todas están con niveles distintos pero con valores cercanos entre sí. ✓ Para el segundo macroestado se tienen 20 microestados, para el tercero, 30 para el cuarto y el quinto 20, para el sexto 60 y para el noveno 30. Al ser tantos microestados, el applet no genera una imagen con los mismos. De los datos calculados, observamos que el macroestado más probable es el sexto.

		✓ Se observa un macroestado con mayor probabilidad configurado por 60 microestados diferentes. ✓ Al aumentar la cantidad de partículas y energía total, aumenta la cantidad de combinaciones posibles para formar, lo que indica un aumento de la cantidad de microestados en cada configuración posible. Su cantidad total de microestados es de 210.
U	i) En el caso anterior, y suponiendo que el sistema está en equilibrio, ¿puede el sistema estar en algún momento en el macroestado (3ε, 3ε, 2ε, 2ε, 1ε, 1ε)? ¿y en el (7ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε, 1ε)? ¿Cuántas más chances tiene el sistema de estar en el primero respecto del segundo?	✓ Si el sistema puede estar en el Macroestado (3,3,2,2,1,1) y luego también en el (7,1,1,1,1,1) Macroestado IX $\Omega = 90$ Probabilidad 90/462 Macroestado I $\Omega = 6$ Probabilidad 6/462 El sistema tiene 84/462 más chances de estar en el primero respecto al segundo ✓ Suponiendo que el sistema alcanzó el equilibrio, el macroestado alcanzado es el VI con la mayor probabilidad, aunque el macroestado (3, 3, 2, 2, 1, 1) no es mucho menos probable por lo que si se tratase de moléculas en un gas en un recipiente aislado como venimos suponiendo, donde existen choques y puede haber intercambios en los niveles de energía, en algún momento se puede alcanzar el macroestado IX propuesto. En el caso del macroestado (7,1,1,1,1,1) solo es posible en un 1,29% por lo que es prácticamente nula en comparación con los macroestados de equilibrio o el propuesto antes. El sistema tiene más de 16 veces más de chances de estar en el macroestado IX que en el I. ✓ Si puede estar en el (3,3,2,2,1,1) ya que es el segundo macroestado más probable, pero sería muy difícil encontrarlo en el (7,1,1,1,1,1) ya que es el segundo menos probable, solo posee 6 microestados contra 120 del primero. Tiene muchas más chances el primero que el segundo pues su probabilidad es 15 veces mayor. ✓ El sistema tiene 84 chances de estar en el primer microestado que en el segundo ✓ La probabilidad de que el sistema esté en el macroestado (3,3,2,2,1,1) es más alta que la probabilidad de que esté en el (7,1,1,1,1,1). Es decir, hay un 1,3% de probabilidad de que el sistema esté en el macroestado I contra un 19,5% de que esté en el IX. Se puede decir que hay 6/462 o 1/77 chances o posibilidades de que el sistema esté en el primer macroestado. ✓ El sistema si podría estar en algún momento en el macroestado (3,3,2,2,1,1) pues su probabilidad es de 0,19 es decir tiene el 19% de posibilidades. En cambio en el macroestado (7,1,1,1,1,1) no

	podría estar ya que su probabilidad es muy pequeña (0,012), 1,2% de posibilidades. $19\% - 1,2\% = 17,8\%$ entonces el primer microestado tiene 17,8% de chance más que el segundo. ✓ Si pueden estar en algún momento (3,3,2,2,1,1) y (7,1,1,1,1,1). Es más probable que el macroestado (3,3,2,2,1,1) esté en el sistema, ya que la posibilidad es más alta que el macroestado (7,1,1,1,1,1). El macroestado IX tiene 19,48 % de estar en el sistema y el macroestado I tiene 1,29% de estar en el sistema. ✓ Si, puede estar en el macroestado (3,3,2,2,1,1) y en el (7,1,1,1,1,1), en este caso es poco probable, pero puede que esté. Tiene 84 chances más el macroestado IX respecto del I ✓ Estando en el equilibrio, el sistema tiene chances de estar en el macroestado (3,3,2,2,1,1) siendo ésta alrededor del 19,5%. Por otro lado, el macroestado (7,1,1,1,1,1) tiene 1% de posibilidades. Este nº es prácticamente nulo, por lo que podríamos decir que es casi imposible que se de este macroestado. ✓ Si el sistema está en equilibrio no puede estar en otro macroestado que no sea el de equilibrio (4,3,2,1,1,1). Fuera del equilibrio las chances de que se encuentre en el primer macroestado son aproximadamente 11% más que en el segundo macroestado. ✓ Si puede encontrarse en la configuración IX, su probabilidad es de aproximadamente el 19%, en cambio en la configuración I se tiene un 1% de probabilidad de que sea donde se encuentra el sistema. Si nos fijamos en la cantidad de microestados que hay en cada una de ellas, notamos que en la configuración IX tenemos 15 veces más microestados que en la configuración por lo tanto es 15 veces más probable que el sistema se encuentre en la IX que en la I. ✓ Es prácticamente imposible que el sistema estando en equilibrio esté en el macroestado I pero es muy probable que esté en el macroestado IX ya que la probabilidad es muy similar al del macroestado de equilibrio. ✓ Para el macroestado (3,3,2,2,1,1) el sistema seguramente estará en algún momento ya que es el segundo en mayor probabilidad de que así sea. Por otra parte para (7,1,1,1,1,1) las probabilidades son realmente muy bajas, éste posee muy bajo nº de microestados.
--	---

V	Si el sistema se encuentra en equilibrio, puede pasar de un microestado a otro? Si es así, ¿esto produce efectos macroscópicos o cambios macroscópicos en el sistema? ¿Cómo incide en la respuesta el número de partículas N que constituyen el sistema? Piense en el análisis de las fluctuaciones realizado en la actividad de las moléculas en una caja.	✓ Si es probable que varíe entre sus 120 microestados. Esto no produce efectos macroscópicos. Si, incide en la respuesta anterior, si N es un nº pequeño la cantidad máxima de microestados va a resultar menor y no tendremos un Ω max muy definido, por lo tanto podrá haber cambios macroscópicos. ✓ Si el sistema está en equilibrio pasa de un microestado a otro todo el tiempo, aunque a nivel macroscópico no son apreciables los efectos en el sistema, ya que justamente los efectos de cambios entre microestados continuos son a nivel microscópicos, muy difíciles de ser observados hasta con herramientas muy precisas. El nº de partículas N hace que a mayor cantidad de partículas, mucho mayor sea la cantidad de microestados posibles por lo que al llegar al equilibrio el paso de un microestado a otro sucede con mayor frecuencia y el rango de microestados en el equilibrio será mayor y de acuerdo con la actividad realizada de las moléculas en una caja, las fluctuaciones se darían alrededor de valores constantes, los valores que nos indican el equilibrio. ✓ Si puede pasar de un microestado a otro en el equilibrio, más aún, está constantemente cambiando de microestado. Al aumentar el nº de partículas N, esto seguirá ocurriendo pero será cada vez más difícil que el sistema se encuentre en un microestado que no pertenezca al macroestado de equilibrio, por lo tanto las fluctuaciones serán cada vez menores (comparadas con el nº de partículas). ✓ Estando en el equilibrio, el sistema puede cambiar de microestado sin producir ningún efecto o cambio microscópico, ya que los microestados en los que variará pertenecerán al mismo microestado de equilibrio. ✓ Estando el sistema en equilibrio, podemos pensar que pasa de un microestado a otro. Pero esto no produciría cambios macroscópicos, porque el sistema se mantendría en el mismo macroestado de equilibrio. Aumentando el nº de partículas, la probabilidad de que el sistema se encuentre en distintos macroestados es muy baja y siempre se mantendría en el macroestado de equilibrio. ✓ Cuando el sistema está en equilibrio, no puede pasar de un microestado a otro. Pero si suponemos el caso donde el sistema se encuentra cercano al equilibrio si hay un cambio de microestados y esto provoca un cambio macroscópico. A mayor nº de partículas N el sistema se acerca cada vez más al equilibrio, se presentan menos fluctuaciones.
---	--	--

	✓ Si el sistema se encuentra en equilibrio entonces se puede pasar de un microestado a otro. Esto no produce cambio macroscópico porque el sistema está en equilibrio. Al aumentar el nº de partículas el sistema tiene más posibilidad de quedar en equilibrio, por lo que la hace más difícil el cambio de microestados. ✓ En equilibrio, el sistema puede pasar de un estado a otro. Esto no produce efectos o cambios macroscópicos en el sistema. Pero si N es muy pequeño, las fluctuaciones serían notables, lo cual produciría cambios o efectos macroscópicos. ✓ Estando el sistema en equilibrio, se puede pasar de un microestado a otro sin observar cambios macroscópicos, ya que hay varios microestados que pertenecen al mismo macroestado. Al aumentar el nº de partículas, aumenta consecuentemente el nº de microestados, como se observó en los experimentos de la caja y de las monedas, por lo que es aún más probable que cambios de microestados no afecten macroscópicamente al sistema. ✓ Si el sistema se encuentra en el equilibrio puede pasar a cualquiera de los 120 microestados que componen el macroestado. No produce cambios macroscópicos ya que la configuración es la misma. A mayor cantidad de partículas el macroestado más probable contará con un nº muy grande de microestados posibles por lo que pasará más tiempo en equilibrio. ✓ Si se pasa de un microestado a otro y estamos en equilibrio, significa que esta variación produce un cambio de macroestado inapreciable. Variando la cantidad de partículas, si queremos pasar de un microestado a otro, este nº va a hacer que sea apreciable o no si hay una variación de macroestado. ✓ El sistema puede pasar de un microestado a otro. Al ser mayor el nº de partículas menor será el efecto macroscópico ya que el macroestado de equilibrio tendrá más cantidad de microestados. ✓ Si el sistema está en equilibrio el sistema puede cambiar de un microestado a otro pero no produce ningún tipo de cambios macroscópicos en él. Pensando en el análisis hecho de moléculas en una caja podemos observar la relación que esta posee con el nº N de partículas con esta, ya que para bajas cantidades las fluctuaciones son muy significativas y podría ser que se produzcan cambios macroscópicos a raíz de esto.
--	--

W	En el caso considerado, el Macroestado de equilibrio incluye el 27% del total de microestados del sistema. Si consideramos otro sistema con mayor número de partículas, que piensa que ocurrirá con ese porcentaje? ¿aumenta, disminuye o se mantiene en torno a ese valor?. Justifique su respuesta.	✓ Notamos que al aumentar N disminuye el nº de macroestados, para una misma cantidad de energía; esto hace que un macroestado determinado tenga una gran cantidad de microestados lo que produce un aumento en el porcentaje de este macroestado, es decir el macroestado de equilibrio ✓ Si consideramos un sistema con mayor nº de partículas N, el porcentaje del microestado de equilibrio será menor, pero el microestado de equilibrio estará rondando porcentajes de probabilidades similares a otros microestados próximos al de equilibrio, por lo que tendremos una cierta cantidad de microestados son los cuales el equilibrio se dará en el sistema. Y los valores de estos microestados oscilarán alrededor del microestado de equilibrio. ✓ Yo pienso que este porcentaje va a disminuir basándome en los gráficos de probabilidad de otras actividades de este trabajo práctico, y en las tablas de esta actividad. Sin embargo aunque el porcentaje baje no significa que sea menos probable, considero que la probabilidad de encontrarse en ese macroestado va a ser en comparación mucho mayor que la de los demás macroestados medida que aumenta N. ✓ Al aumentar el nº de partículas, pero no la cantidad de energía total, la probabilidad de que el sistema se encuentre en el macroestado de equilibrio será mucho mayor. Es decir, el porcentaje aumentará. ✓ El porcentaje aumentará porque al aumentar el nº de partículas, aumentan la cantidad de microestados y el microestado más probable aumentará mucho más en comparación con los demás (la gráfica cada vez más puntuda) . Por lo tanto al realizar la diferencia entre este número y el total de microestados el valor será mayor. ✓ Cuando se aumenta el nº de partículas, y no se cambia la energía hay mucha más posibilidad de que el sistema se encuentre en macroestado de equilibrio. Por lo tanto el porcentaje aumenta. ✓ Si consideramos otro sistema con mayor nº de partículas, el macroestado de equilibrio aumentaría el porcentaje del total de microestados del sistema, ya que para ese macroestado aumentaría el número de microestados ✓ Análogamente a casos anteriores, a mayor nº de partículas, más centrada en el valor más probable estará la probabilidad, por lo que al aumentar el nº de partículas, la probabilidad de que se dé
---	--	--

	ese macroestado en el equilibrio será mayor. ✓ Se mantiene en torno a ese valor porque la distribución de los microestados en los diferentes macroestados es similar en todos los casos. ✓ Si aumentamos la cantidad de partículas va a aumentar la cantidad de microestados posibles en esa configuración, por lo tanto tendrá una mayor parte de la cantidad de microestados de todo el sistema, de esta forma aumenta su probabilidad. <u>Conclusión:</u> Las partículas de un gas, en un recinto tratan de ocupar todo el volumen disponible. Y dado su movimiento y considerando los choques con las paredes del mismo se ve un aumento de su energía hasta estabilizarse. Se puede decir que la entropía está asociada al desorden molecular que al empezar los experimentos sufre un aumento considerado pero luego tiene un comportamiento aproximadamente constante. ✓ Con un n° mayor de partículas el porcentaje del macroestado disminuye pero aumentan sus correspondientes microestados. ✓ Si consideramos un sistema con mayor n° de partículas, el n° perteneciente al mayor porcentaje de equilibrio se va a ver reducido. Esto sucede por la cantidad de microestados nuevos del sistema ya que nos encontramos con más y nuevos en torno al macroestado de equilibrio, estos adoptan valores cercanos al mismo y se distribuyen más equitativamente entre los del nuevo sistema.
--	---

SINTESIS DE LAS RESPUESTAS POR GRUPO

GRUPOS	EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio)	CRITERIOS DE EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Tirada de monedas)	INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE ENTROPIA	CRECIMIENTO ASINTÓTICO A UN MÁXIMO	REVERSIBLE/IRREVERSIBLE	ASOCIACIÓN DE N_i Y N_D CON VARIABLE MACROSCÓPICA (CASO DE UN GAS)	DETECCIÓN DE FLUCTUACIONES CON UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
1	El valor medio de Ni-Nd se aproxima a cero a medida que n y tiempo tiende a infinito	Osc. Amort	El equilibrio se alcanza cuando las fluctuaciones son mínimas (eso parece indicar que hay que esperar a que se reduzcan las fluctuaciones)	Pequeñas mientras que la cantidad de partículas de un lado y del otro tienden a infinito en el tiempo.	Tiempo y fluctuaciones	No se cumple para pocas	Escasa probabilidad de que vuelvan a su estado inicial	Presión constante. En un tiempo tenemos misma cantidad de partículas chocando a la izquierda y a la derecha	No existe instrumento que contabilice cantidad de partículas con sus posiciones y velocidades en todo tiempo
2	EQUILIBRIO COMO NI-ND=0	Confusa interpretación de la gráfica Ni-Nd, donde habla de promedios temporales para un instante	Corta las gráficas en el primer instante en que llega a N=Ncruz	Con pocas hay más fluctuaciones	Solo fluctuaciones explica usando multiplicidad, inentendible microestados, macroestados, reversibilidad	No se cumple para pocas	Imposibilidad	temperatura	Si son pocas fluctuaciones no las detecta. Si el salto es grande sí
3	Equilibrio cuando el gas se expande y ocupa todo el recipiente y cuando Ni=Nd cuanto mayor es n más constantes son las variables macroscópicas	los discos tratan de ocupar la totalidad del recipiente el valor de Ni-Nd oscila alrededor de cero, Ni-Nd es en promedio casi cero, casi constante en el tiempo	Entropía máxima a la que se llega asintóticamente con pocas se estabiliza pero no hay comportamiento asintótico	A mayor cantidad de partículas las variables macroscópicas parecen ser constantes.	Solo fluctuaciones explica usando microestados, macroestados, reversibilidad	No se cumple para pocas	Imposibilidad	Densidad no permanece constante en el tiempo porque los discos se mueven libremente	No son perceptibles si la cantidad de partículas son muchas.

GRUPOS	EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio)	CRITERIOS DE EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Tirada de monedas)	INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE ENTROPIA	CRECIMIENTO ASINTÓTICO A UN MÁXIMO	REVERSIBLE/IRREVERSIBLE	ASOCIACIÓN DE N_i Y N_0 CON VARIABLE MACROSCÓPICA (CASO DE UN GAS)	DETECCIÓN DE FLUCTUACIONES CON UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
4	Ni-Nd no necesita ser cero sino que debe ser pequeña	El valor medio aceptado en estas gráficas es un rango de números alrededor del cero que se mantiene constante y se espera que el sistema se mantenga dentro del rango para pocas partículas se puede percibir las fluctuaciones	Ncaras – Ncruces debe mantenerse constante dentro de un rango de variaciones	Para pocas monedas “es más difícil observar el equilibrio	No responde	No responde	Escasa probabilidad	No asocia con ninguna variable macroscópica	Se pueden detectar si el número de partículas es pequeño. Si el número de partículas es muy grande el instrumento permitiría detectar todos los estados de un sistema
5	Valor medio cero que se mantiene constante en el tiempo	El equilibrio es más notorio cuanto mayor es el número de partículas	Entropía constante y Ni-Nd=0 (a la vista)	Las fluctuaciones disminuyen con el aumento de n	Solo tiempo	Fluctuaciones es cuestión de escala valido para número infinito de monedas	Escasa probabilidad	Distribución homogénea en todo el recipiente	Si para pocas partículas. Imperceptible para muchas.
6	Ni-Nd=0 el sistema está más próximo al equilibrio cuanto mayor sea el número de partículas	las fluctuaciones se achican con n	Numero de caras similar al de cruces	Numero de caras no es constante, pero para n grandes se la puede considerar como tal, ya que las fluctuaciones son menores en relación a la cantidad de monedas que hay	Con más tiempo y más monedas entra en equilibrio		Escasa probabilidad	No asocia	No responde

GRUPOS	EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio)	CRITERIOS DE EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Tirada de monedas)	INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE ENTROPÍA	CRECIMIENTO ASINTÓTICO A UN MÁXIMO	REVERSIBLE/IRREVERSIBLE	ASOCIACIÓN DE N_i Y N_0 CON VARIABLE MACROSCÓPICA (CASO DE UN GAS)	DETECCIÓN DE FLUCTUACIONES CON UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
7	$N_i=N_d$ y que se mantenga un tiempo equilibrio absoluto que se logrará si se mantiene en $N_i=N_d$	Las variaciones indican el comportamiento direccional de las partículas para ocupar el volumen disponible	Entropía con pocas variaciones	Se equivoca, no hace enter	Tiempo y fluctuaciones	Equilibrio indica máxima entropía	Depende de la cantidad de partículas. muchas es irreversible	Energía cinética	Termómetro mide la temperatura en el equilibrio. A mayor N el equilibrio se alcanza más rápido
8	Equilibrio absoluto. para todo tiempo $N_i=N_d=0$	Las fluctuaciones indican que el sistema no está en equilibrio	Entropía constante como criterio para mil para 10 cuando $N_i=N_d=0$ por primera vez	Equilibrio como atractor al que el sistema tiende a volver el equilibrio se pierde pero se recupera	Tiempo y fluctuaciones	No se cumple para pocas	Propiedad natural	Presión. Ésta es provocada por el choque continuo de todas las moléculas contra las paredes de la caja	Se perciben si el número de partículas del sistema es relativamente bajo. si el número de partículas es grande se hacen imperceptibles.
9	Equilibrio teórico absoluto $N_i=N_d=0$ que solo se cumple cuando el número de partículas sea infinito se redefine así: cuando la probabilidad de $N_i=N_d=0$ sea grande, lo cual ocurre para un numero grande de partículas $N_i=N_d=0$ corresponde al macroestado con mayor cantidad de microestados	Los valores fluctúan en torno al equilibrio teórico $N_i=N_d$ no se mantiene constante en el equilibrio redefinido, sino que oscila, por lo tanto dependiendo del grado de aproximación a utilizar, podrá considerarse o no en equilibrio el valor medio debería ser cero, aunque eso es improbable para todo tiempo	Criterio: la entropía presentando pocas fluctuaciones no hizo enter tiende a ser más constante	Buenas explicaciones	Solo fluctuaciones explica usando microestados, macroestados, reversibilidad	No se cumple para pocas	Confusos/macroestados	Temperatura	Las variaciones de cada una de las moléculas son imperceptibles e inmediatas porque no existe el instrumento que mida ese tipo de variaciones

GRUPOS	EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio)	CRITERIOS DE EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Tirada de monedas)	INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE ENTROPIA	CRECIMIENTO ASINTÓTICO A UN MÁXIMO	REVERSIBLE/IRREVERSIBLE	ASOCIACIÓN DE N_i Y N_0 CON VARIABLE MACROSCÓPICA (CASO DE UN GAS)	DETECCIÓN DE FLUCTUACIONES CON UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
10	$N_i = N_0$ instantáneo cuando el número de partículas es constante	Osc. Amort	Lo hace mal, no hace enter	Lo hace mal, no hace enter	Solo tiempo y n fluctuaciones es cuestión de escala	Agrega a n el tiempo	Es irreversible para un número muy grande de partículas	Presión y Temperatura	No se pueden detectar
11	valor medio de $N_i - N_0 = 0$ y constante en el tiempo eso se cumple para cualquier número de partículas. la diferencia oscila alrededor del cero	Las fluctuaciones son mínimas variaciones de estado y son imperceptibles para cualquier	Criterio de equilibrio igual cantidad de cruces que de caras a lo largo del tiempo	Las fluctuaciones son menores con mayor cantidad de monedas	Solo fluctuaciones	No se cumple para pocas	Cuando el número de partículas es muy grande la reversibilidad es inexistente	Cantidad de sustancia	En el equilibrio, las variaciones son imperceptibles
12	equilibrio absoluto, cuando $N_i - N_0 = 0$	Dificultad para reconocer lo propio de lo macro y lo propio de lo micro problemas con el valor medio	Entropía constante como criterio de equilibrio para pocas monedas primera vez $N_{caras} - N_{cruces} = 0$	El valor medio varía con el tiempo	Tiempo y fluctuaciones	No se cumple para pocas	No responde	No responde	Cuando las moléculas son pocas es posible detectarlas con un instrumento.

GRUPOS	EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Irreversibilidad y Fluctuaciones en el equilibrio)	CRITERIOS DE EQUILIBRIO	FLUCTUACIONES (Tirada de monedas)	INTERPRETACIÓN DE GRÁFICAS DE ENTROPIA	CRECIMIENTO ASINTÓTICO A UN MÁXIMO	REVERSIBLE/IRREVERSIBLE	ASOCIACIÓN DE N_i Y N_0 CON VARIABLE MACROSCÓPICA (CASO DE UN GAS)	DETECCIÓN DE FLUCTUACIONES CON UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
13	El valor medio de la diferencia permanece constante en el tiempo	Con mayor número de bolitas es más probable que se igualen N_i y N_0 asocia con irreversibilidad	Ncaras próximo a Ncrucos y que permanezca razonablemente invariable en el tiempo	El equilibrio no se da con valores exactos sino que ronda en valores	Solo fluctuaciones	No se cumple para pocas	En el equilibrio el proceso es irreversible, Esto se da para muchas partículas	Presión	No. Con moléculas los cambios son pequeños y a la velocidad que estas se mueven son imperceptibles para cualquier instrumento
14	Criterio macro: cuando las funciones de estado del sistema asumen un valor constante en el tiempo	cuanto mayor sea n mucho menores serán los valores entre los que varía $N_i - N_0$, el valor medio de $N_i - N_0$ es cero el cual va variando mientras pasa el tiempo. Asocia con irreversibilidad	Criterio: que la entropía haya llegado a su máximo y permanezca constante con pocas monedas hay fluctuaciones	A mayor N menores serán las fluctuaciones	Tiempo y fluctuaciones	A igualdad de partículas o de monedas la entropía llega a un máximo	Irreversibles para N grande	Volumen	No sabe que instrumento mide fluctuaciones pero mientras mayor sea N esta medición será más difícil, por lo que se necesita un instrumento más sensible.

ANEXO C:

GUIA DE ACTIVIDADES REFORMULADA

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 1: Urna de Boltzman

Introducción

La simulación representa resultados del procedimiento de extracción de un número de bolitas de una urna que contiene igual número de bolitas rojas y azules. Lo único que distingue a una bolita de otra es el color. Se puede establecer el número de bolitas a extraer y el número de extracciones a realizar. En pantalla aparece una urna conteniendo las bolitas de colores con algunos botones que permiten operar opciones de configuración interna. Un botón permite modificar la velocidad de extracción desde un modo lento hasta un modo más rápido; otro botón permite fijar el número de bolitas a extraer (de 2 a 15); otro botón permite elegir el número de extracciones (de 1 a 991) y finalmente un botón permite visualizar los histogramas de frecuencia y la probabilidad en función del número de bolitas azules extraídas. En el applet se observan las bolitas azules.

Objetivos.

- Distinguir entre frecuencia y probabilidad
- Adquirir concepto de configuración, macroestados y microestados.

Actividades

1.1.- Frecuencia y Probabilidad

a) Como primer paso, explorar la simulación y analizar los casos que se indican en la tabla siguiente. Para cada caso, capturar las imágenes de las gráficas de frecuencia y probabilidad e insertarlos en la hoja:

Nº de bolitas a extraer	Nº de extracciones
3	4
3	50
15	4
15	50
15	990

b) Responder las siguientes cuestiones:

- ¿En qué casos las gráficas de probabilidad y frecuencia se aproximan más entre sí?
- ¿Cómo cambia la curva de probabilidad con el aumento del número de bolitas extraídas?
- El applet solo admite extraer un máximo de 15 bolitas y 1000 extracciones. ¿Qué sucedería para 15 bolitas en las gráficas de probabilidad y frecuencia, si se pudiera hacer un número de extracciones muy grande, como por ejemplo 10000 extracciones?

1.2.- Macroestados y Microestados. Multiplicidad

a) Extracción de cuatro bolitas

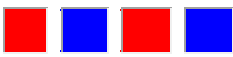
Presentamos más abajo una tabla, en la que se muestran los modos posibles que pueden ocurrir en la extracción de 4 bolitas. Cada cuadradito coloreado indica una bolita (azul o roja). Caracterizamos cada configuración por el número de bolitas azules. Las posibles

configuraciones serán: A: 4 bolitas azules; B: 3 bolitas azules; C: 2 bolitas azules; D: 1 bolita azul; E: 0 bolitas azules. Cada configuración constituye un macroestado. A cada macroestado corresponde un valor de multiplicidad que viene dado por el número de microestados asociados con él.

Observamos que:

- la configuración A puede obtenerse de 1 solo modo (1 microestado)
- la configuración B puede obtenerse de 4 modos (4 microestados)
- la configuración C puede obtenerse de 6 modos (6 microestados)
- la configuración D puede obtenerse de 4 modos (4 microestados)
- la configuración E puede obtenerse de 1 solo modo (1 microestado)

Completar la tabla y responder cuál es el macroestado más probable; cuál es la cantidad de microestados que le corresponde y cuál es la cantidad total de microestados total del sistema.

I	II	III	IV	(Macroestados)	Multiplicidad (Nº de microestados) Ω	Probabilidad
				A	1	1/16
				B	4	
						
						
						
				C	6	
						
						
						
				D	4	
						
						
						
				E	1	

b) Caso general (N bolitas)

En el caso anterior, la multiplicidad (Ω) puede determinarse fácilmente contando los microestados correspondientes a cada macroestado. Pero si el número de bolitas a extraer es mayor, la situación se complica, por lo que importa contar con una expresión general que permita realizar el cálculo.

Consideremos extracciones de N bolitas. Los diferentes macroestados corresponderán a 1 bolita azul; 2 bolitas azules;; $(N-1)$ bolitas azules; N bolitas azules.

Nos interesa el número de modos distintos en que podemos extraer N bolitas con una configuración determinada, es decir, n_b bolitas azules y n_r bolitas rojas. No nos importa el orden en que las bolitas son extraídas.

El número de diferentes modos en que es posible ordenar N objetos distintos es $N!$ (**permutaciones de N**). Pero el número de modos de la configuración mencionada será menor que $N!$, ya que no nos interesan las permutaciones de las bolitas azules entre sí, ni de las rojas entre sí (las bolitas azules son indistinguibles entre sí; ídem las rojas).

Entonces, el número de modos en que podemos obtener n_b bolitas azules y n_r rojas en N extracciones viene dado por:

$$\Omega = N! / (n_b! n_r!)$$

O, teniendo en cuenta que $n_r = N - n_b$,

$$\Omega = N! / n_b! (N - n_b)!$$

Otro modo de explicar la expresión es la siguiente:

Hay un sólo modo de ordenar N esferas idénticas, ya que, siendo idénticas, cualquier sucesión es equivalente a cualquier otra; mientras que hay muchos modos diferentes de ordenar N esferas distintas: N esferas, todas diferentes, pueden ser ordenadas en $N!$ (*factorial de N*) modos distintos (la primera en N modos, la segunda en $(N-1)$ modos, etc....), pero si n_b son idénticas entre sí y n_r son también idénticas entre sí (aunque diferentes de las precedentes), $n_b!$ y $n_r!$ modos no son más distintos, y el número $N!$ deberá ser dividido por $n_b!$ y por $n_r!$.

Si la urna hubiese contenido tres colores (azul, rojo y verde), el número de modos en que habríamos podido obtener n_b bolitas azules, n_r bolitas rojas y n_v verdes, viene dado por:

$$\Omega = N! / (n_b! n_r! n_v!)$$

Podemos ahora generalizar la expresión. El número de modos distintos de una partición de N partículas en n grupos distintos ($n_1! n_2! n_3! \dots n_n!$) formados sobre la base de n propiedades distintas (color, valor de la energía, dimensiones,.....), es:

$$\Omega = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$$

c) **Aplicación del caso general.** Análisis para el caso en que se extraen 15 bolitas.

Con ayuda de una planilla Excel, completar la tabla siguiente para el caso de extracción de 15 bolitas y representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad en función del número de bolitas azules.

n_b (cantidad de bolitas azules)	Multiplicidad (Ω) $\Omega = N! / n_b! (N - n_b)!$	Probabilidad
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

11		
12		
13		
14		
15		

Comparar la gráfica de probabilidad obtenida con la que presenta el applet para el caso de extracción de 15 bolitas.

Responder:

- ¿Cuál es el macroestado con mayor número de microestados y por ende el más probable?
- ¿Cuál es el número total de microestados?

d) Análisis comparativo.

Utilizando una planilla Excel, analizar los casos correspondientes a $N=20$ y $N=100$, completando los datos de la siguiente tabla. Representar gráficamente la multiplicidad y la probabilidad para cada caso.

N= 20			N=100		
n_b	Ω	Probabilidad	n_b	Ω	Probabilidad
0			0		
1			5		
2			10		
3			15		
4			20		
5			25		
6			30		
7			35		
8			40		
9			45		
10			50		
11			55		
12			60		
13			65		
14			70		
15			75		
16			80		
17			85		
18			90		
19			95		
20			100		

Responder:

- ¿Qué diferencias se observan en las gráficas de los dos casos anteriores? Explicar.
- ¿Qué forma adoptarían dichas gráficas si N fuera enormemente grande?

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 2: Tirada de Monedas

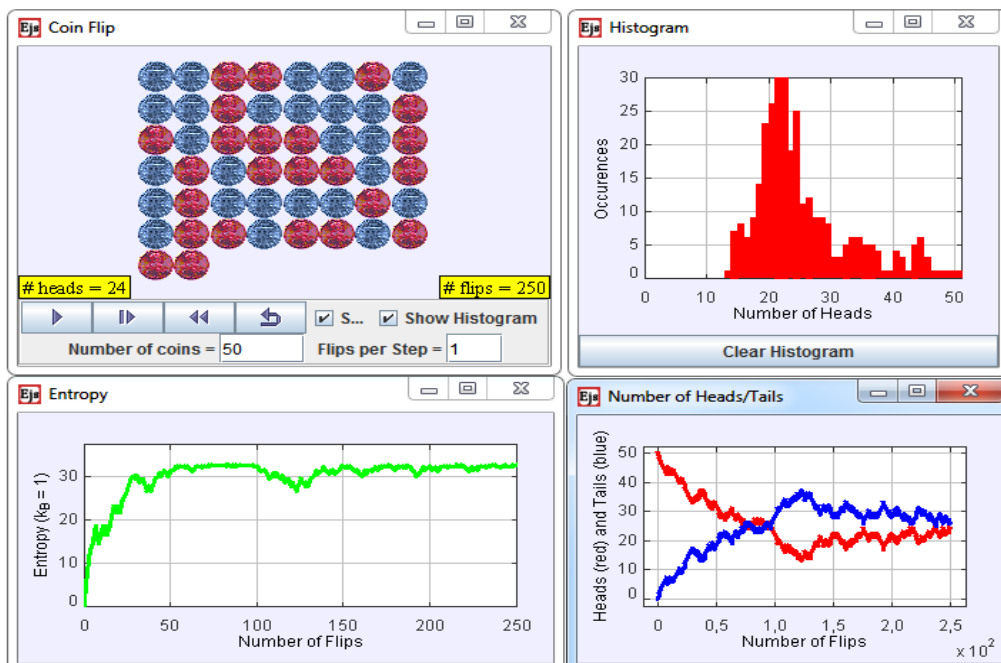
Introducción

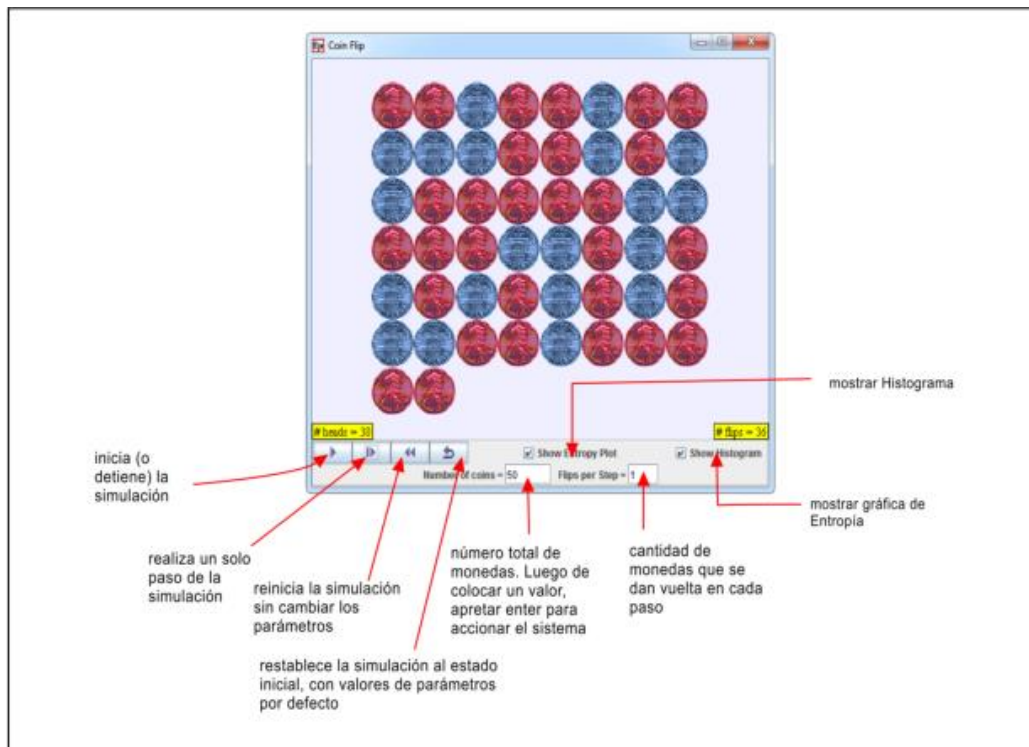
La simulación modela un sistema simple de N monedas dispuestas en filas ordenadas. Inicialmente todas las monedas están con la cara hacia arriba. En cada paso de la simulación una moneda es elegida al azar y dada vuelta. Una ventana de animación muestra el conjunto de monedas (con las caras en color rojo, y cruces en color azul). Se muestra gráficamente el número de caras (en rojo) y cruces (azul) en función del tiempo (en realidad, en función del número de pasos realizados).

Dos botones en la consola principal permiten además abrir dos ventanas en las que se representa el histograma de frecuencias (del número de veces que el sistema ha tenido un determinado número de caras hacia arriba) y la “entropía” del sistema, calculada como $S = \ln \Omega$ donde se adopta $k = 1$.

El usuario puede cambiar el número total de monedas (de 2 a 2000) colocando el número deseado en la ventana correspondiente (hay que presionar ENTER para que el sistema acepte el nuevo valor, y luego el botón de inicio para comenzar). También puede establecerse el número de monedas que el sistema da vuelta (flips) en cada paso (step), colocando el número deseado en Flips per Step (un valor grande hace que la simulación funcione más rápido).

Las figuras siguientes muestran las ventanas disponibles y explican los controles en la consola principal.





Objetivos:

- Recuperar las nociones de microestado, macroestado y multiplicidad en un nuevo contexto
- Verificar diferencias en el comportamiento del sistema cuando intervienen muchos y pocos elementos.
- Analizar la noción de equilibrio y el concepto de irreversibilidad desde una perspectiva microscópica.
- Observar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con N (número de partículas componentes del sistema).
- Analizar cómo varía la entropía del sistema en función del tiempo y observar el comportamiento de $S(t)$ para valores grandes y pequeños de N .

Actividades.

2.1- Explorando la Simulación.

a) Observe el comportamiento del sistema para cantidades pequeñas y grandes de monedas. Pruebe con 2, 4, 20, 100, 1000, 2000 monedas. En cada caso observe los cambios que se producen en las tres ventanas disponibles. Puede seguir las simulaciones paso a paso o dejarlas correr de manera continua. También puede elegir dar vuelta una moneda por paso o más monedas en cada paso.

b). Capture las imágenes para los casos de 20 y para 1000 monedas. En ambos casos corra las simulaciones a razón de 1 flip por step y tome las imágenes cuando se hayan transcurrido 200 flips. Analice las gráficas obtenidas y explique cualitativamente las diferencias que observa entre los dos casos considerados. ¿A qué atribuye Ud. las diferencias observadas?

2.2. Configuración, Macroestados, microestados, multiplicidad.

a) En la actividad 1 discutimos los conceptos de configuración, macroestado, microestado y multiplicidad. ¿Cómo se aplican dichos conceptos en el caso de las monedas? Ilustre ejemplificando para el caso de cuatro monedas.

b) Haga correr la simulación para el caso de cuatro monedas. Capture las representaciones de las ventanas Histograma y Número de caras y cruces. Explique qué representa cada uno de esos gráficos y cómo se relacionan entre sí.

c) Haga correr la simulación para el caso de 1000 monedas. ¿Cuál es en este caso el macroestado con mayor número de microestados y por ende el más probable?

2.3. Equilibrio y fluctuaciones en el equilibrio

a) Considere el caso de 1000 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio?

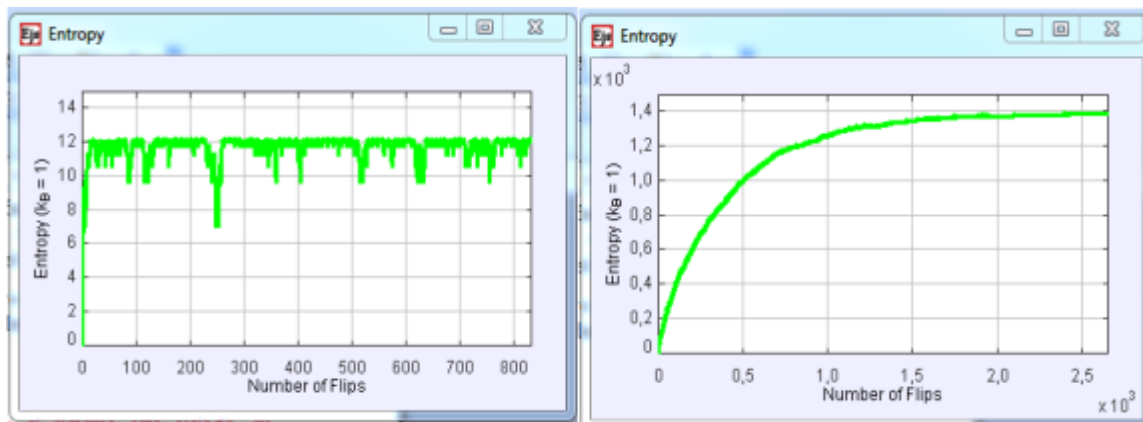
b) Considere el caso de 10 monedas. Deje correr la simulación hasta que considere que el sistema ha alcanzado el equilibrio y detenga la simulación. Capture las imágenes. ¿qué criterio utilizó para determinar cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio? ¿tiene sentido hablar de equilibrio en este caso? Explique.

c) ¿Qué valor toma, en el equilibrio, la variable “número de caras” para los casos considerados en (a) y en (b)? ¿Puede dicho valor considerarse constante, o presenta fluctuaciones? Explique.

2.4. Entropía

La ventana Entropía representa el valor, paso a paso, de la entropía del sistema, es decir, de $S = k \ln \Omega$ en función del número de flips (se toma $k = 1$ por simplicidad).

a) Las gráficas de abajo muestran dicha ventana para 20 monedas y 2000 monedas respectivamente. Como puede verse, son muy diferentes. Intente explicar por qué se dan esas diferencias.



b) Cuando consideramos sistemas reales, sabemos que, cuando el sistema está aislado, su entropía crece hasta alcanzar un valor estable máximo. En el caso de la tirada de monedas, ¿es válida esta afirmación en los sistemas de pocas monedas? A partir de qué número de monedas podríamos considerar que se produce esa tendencia?

c) Observando la ventana que grafica la entropía en función del número de flips, describa lo que sucede con la entropía y describa lo que observa al mismo tiempo en la ventana que muestra el histograma en función del número de caras.

d) Observar la gráfica del número de caras y de cruces en función del número de flips conjuntamente con la entropía y extraer conclusiones respecto a las fluctuaciones que se observan en la pantalla.

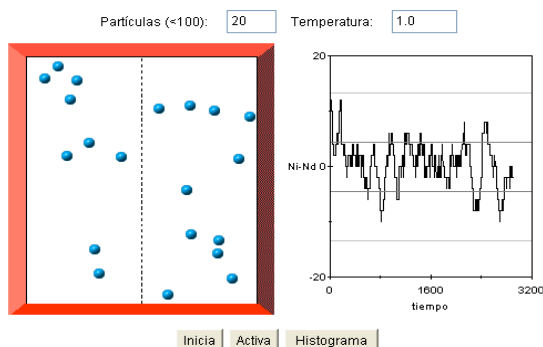
TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 3: Irreversibilidad y fluctuaciones en el equilibrio

Introducción

El applet simula moléculas de un gas ubicadas en una caja. El modelo es bidimensional y las moléculas son representadas por discos rígidos. Se consideran para el análisis solo las posiciones de las moléculas y de un modo muy simplificado: se analiza solamente como se reparten las moléculas en cada momento entre la mitad izquierda y la derecha de la caja. Concretamente, la variable que se contabiliza es la diferencia entre el número de moléculas ubicadas en la mitad izquierda y el número de moléculas ubicadas en la mitad derecha ($N_i - N_d$).



El applet permite variar el número de moléculas y la temperatura. Inicialmente todas las moléculas están ubicadas en la mitad izquierda.

El modelo es similar a los casos ya analizados de la Urna de Boltzmann y la Tirada de monedas. El número de bolitas azules en el primer caso, o el número de caras en el segundo, corresponde aquí al número de moléculas en el lado izquierdo de la caja. Cada suceso, que en la urna correspondía a cada extracción, corresponde aquí a un “paso” de la simulación, con una distribución particular de moléculas a la izquierda y a la derecha.

Es importante tener en cuenta que el modelo utilizado en el applet es sumamente simplificado y no contempla adecuadamente toda la complejidad correspondiente a la representación de un gas. Por un lado, las variables que deberíamos considerar incluyen la velocidad de las moléculas, además de su posición. Por otro lado, la posición ha sido solo considerada en una dimensión y con sólo 2 posibles valores discretos (izquierda y derecha).

Este applet nos muestra la secuencia temporal. A la derecha del recipiente una gráfica muestra permanentemente ($N_i - N_d$) en función del tiempo. Nótese que el applet no representa el número de moléculas a la izquierda (N_i) sino la diferencia $N_i - N_d$. De modo equivalente, en los gráficos de la Urna de Boltzmann podría haberse trabajado con la diferencia entre el número de bolitas azules y el número de bolitas rojas.

Abajo del recipiente se encuentran 3 botones. Pulsando **Inicia**, comienza la evolución en la que las moléculas se mueven aleatoriamente. El botón **Pausa** detiene el proceso. Para continuar hay que pulsar **Activa**. El botón **histograma** abre una ventana que muestra la gráfica de frecuencia de ($N_i - N_d$). Pulsando ese botón en distintos momentos pueden obtenerse gráficos sucesivos que permiten observar cambios en la frecuencia.

Objetivos:

- Analizar la noción de equilibrio y el concepto de irreversibilidad desde una perspectiva microscópica.
- Observar que en el equilibrio el valor medio de las magnitudes macroscópicas se mantiene constante, aunque dichas magnitudes muestran fluctuaciones en torno a ese valor medio.

- Observar las fluctuaciones en el equilibrio y comprender que las mismas decrecen con N (número de partículas del sistema)

Actividades.

3.1. Microestados y macroestados

Antes de comenzar a correr la simulación, considere el caso en que la caja contiene sólo cuatro partículas. Construya, para ese caso, una tabla similar a la realizada en la Actividad 1 para cuatro bolitas, completando los datos de los macroestados y microestados correspondientes.

3.2 Equilibrio y fluctuaciones en el equilibrio

- a) Fijar el número de partículas en 2; luego en 4; luego en 10; luego en 20, luego en 60 y finalmente en 90. En todos los casos fijar la temperatura en un valor 8. Una vez que inicie la simulación, dejar correr el tiempo y para cada caso, apretando pausa, capturar: la imagen del recipiente, la gráfica que aparece a la derecha y el histograma correspondiente, insertándolos en la hoja. Analizar las gráficas y explicar las diferencias.
- b) Responder las siguientes cuestiones:
 - i) En los casos analizados, ¿diría que el sistema ha alcanzado el equilibrio? ¿Cómo caracterizaría usted equilibrio?
 - ii) ¿Se mantiene constante el número de partículas en el lado izquierdo cuando el sistema está en equilibrio? Si no es así, ¿en qué consiste el equilibrio?
 - iii) Considere la gráfica de $N_i - N_d$ en función del tiempo de cada uno de los casos anteriores. Describa de modo cualitativo el comportamiento de $(N_i - N_d)$ en función del tiempo en el equilibrio. ¿qué indican las variaciones o fluctuaciones que se observan en la gráfica? ¿Cuál es el valor medio de $N_i - N_d$? ¿Ese valor medio varía o permanece constante en el tiempo?

3.3. Variables microscópicas y macroscópicas

A nivel macroscópico, no podemos individualizar cada molécula de un gas. El estado del gas viene dado por el valor que toman sus variables macroscópicas (volumen, presión, temperatura, densidad).

- iv) ¿Podría asociar N_i y N_d con alguna variable macroscópica, en el caso de que se tratara de las moléculas de un gas? ¿Cómo describiría el comportamiento de esa variable en el equilibrio?
- v) ¿Considera que las variaciones o fluctuaciones son perceptibles o podrían detectarse a través de algún instrumento? ¿Cambia su respuesta en función del número de moléculas N utilizadas en el modelo? Explique.

3.2. Irreversibilidad y la dirección del tiempo.

La experiencia nos dice que un gas se expande hasta ocupar todo el recinto, y que nunca se observa que el gas se vuelva a concentrar en una parte del recipiente. Se argumenta así que la evolución temporal nos conduce de un estado inicial, con el gas concentrado en una región, a un estado final, con el gas ocupando todo el recinto. Pero la situación inversa no se observa. Por ello, la secuencia de estados tiene una dirección temporal determinada y se dice que el proceso es irreversible.

Considerando los casos analizados en la simulación, diría Ud. que los procesos observados son irreversibles? Varía su respuesta si consideramos el sistema con un número pequeño o muy grande de partículas? Explique.

TRABAJO PRÁCTICO: ENTROPÍA DE BOLTZMANN

GUÍA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD 4: Multiplicidad

Introducción.

En esta actividad retomamos el caso de moléculas de un gas ubicadas en una caja. El modelo es bidimensional y las moléculas son representadas por discos rígidos. Pero, a diferencia del caso analizado en la Actividad 2, donde estudiamos la manera como se distribuían las partículas a la derecha y la izquierda de la caja, es decir, donde tuvimos en cuenta la distribución de posiciones, ahora consideraremos cómo se distribuyen las energías de las partículas. Más concretamente, analizaremos cómo se distribuyen las partículas en intervalos regulares de energía.

En el caso de un gas ideal, la energía de cada partícula es solamente su energía cinética, que depende del cuadrado de su velocidad. Consideramos que las interacciones de las partículas entre sí y con las paredes del recipiente son elásticas. Entonces, la energía cinética total del sistema se mantendrá constante. Sin embargo, las partículas irán modificando su velocidad, y por ende su energía, a partir de las interacciones.

La figura (a) representa, en un instante t , los vectores velocidad de 8 partículas (representadas como discos rígidos) ubicados en una caja. La energía total del sistema, que permanece constante, es igual a 8 (en unidades arbitrarias).

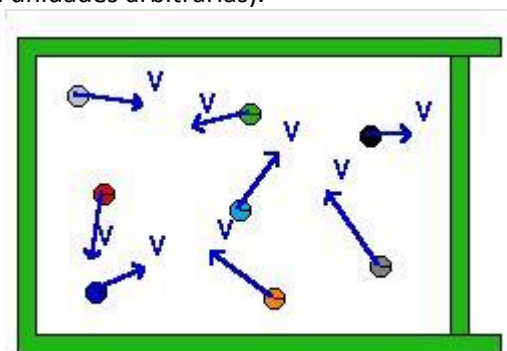
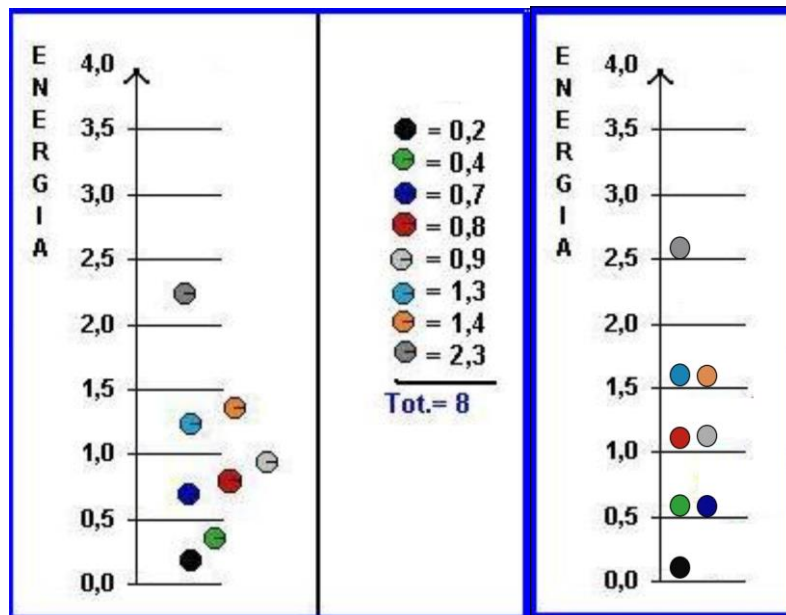


Figura (a): Ocho partículas en una caja. Vectores velocidad en un instante t

La figura (b) muestra los valores de energía cinética de cada partícula en ese instante. En el eje de energía se han marcado valores discretos a intervalos regulares de 0,5 unidades de energía y cada partícula queda entonces ubicada en alguno de esos intervalos. Tenemos 2 partículas en el rango entre 0 y 0,5; 3 entre 0,5 y 1; 2 entre 1 y 1,5; 0 entre 1,5 y 2; 1 entre 2 y 2,5.

La figura (c) muestra una versión simplificada del caso anterior., considerando niveles de energía, en lugar de intervalos. Sólo se han considerado valores discretos de energía (0; 0,5; 1; 1,5; etc.) y se ha asignado a cada partícula la cantidad de energía correspondiente al valor discreto más cercano.



Figuras (b) y (c): Ocho partículas en una caja. Distribución de energía por intervalos y en valores discretos.

Esta operación nos ha hecho perder el conocimiento del detalle de los valores de la energía de las partículas individuales y nos da una descripción aproximada del sistema (de hecho, el valor de la energía total obtenida con esta aproximación es 8,5 unidades de energía)¹, pero, como veremos a continuación, hemos adquirido la capacidad de caracterizar los macroestados del sistema y calcular su multiplicidad

La distribución mostrada en la figura (c) es un macroestado del sistema. Dicho macroestado queda caracterizado por la cantidad de partículas que ocupan cada nivel de energía. Podemos representarlo del siguiente modo: (1, 2, 2, 2, 0, 1). Esto significa que el macroestado considerado corresponde a 1 partícula en el primer nivel (energía = 0), 2 partículas en el segundo (energía = 0,5); 2 en el tercero (energía = 1), 2 en el cuarto (energía = 1,5), 0 en el quinto (energía igual 2) y 1 partícula en el sexto nivel (energía = 2,5).

Podemos calcular la cantidad de microestados asociados a dicho macroestado, utilizando la expresión que vimos en la actividad 1.

Planteamos allí que el número de modos distintos de una partición de N partículas en n grupos distintos ($n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$) (en este caso debido a poseer diferentes valores de energía), viene dada por:

$$\Omega = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots n_n!)$$

En el caso que estamos considerando, sería $N=8$; $n_1=1$; $n_2=n_3=n_4=2$; $n_5=0$; $n_6=1$, y

$$\Omega = 8! / (1! 2! 2! 2! 0! 1!) = 5040$$

En otro momento, y a partir de las interacciones entre ellas, las partículas tendrán otros valores de energía (siempre con la restricción de la energía total constante e igual a 8). La cantidad de partículas en cada nivel podrá entonces ser otra, es decir, el sistema se encontrará en un macroestado diferente. Por ejemplo, otro macroestado posible es (0,4,1,0,0,2), que corresponde a 840 microestados.

¹ Cuanto más pequeños sean los intervalos de energía que consideremos, más nos aproximaremos a la situación concreta que estamos representando.

El applet que usaremos en esta actividad muestra gráficamente la distribución de las partículas por intervalo de energía para situaciones como la descrita anteriormente. El applet permite modificar el número N de partículas (entre 2 y 5) y la energía total E (entre 1 y 11).

La energía total viene dada por la suma de las energías de cada partícula.

En el applet, a cada partícula puede atribuírsele una unidad discreta de energía, de valor 1ε , 2ε , 3ε ..., $n\varepsilon$. En realidad el applet toma, por simplicidad, $\varepsilon = 1$, con lo cual, los niveles de energía que considera son 1, 2, 3, ..., etc.

La energía total, que se mantiene fija, queda entonces expresada en función de las energías individuales por la siguiente expresión:

$E_T = n_1 \cdot 1\varepsilon + n_2 \cdot 2\varepsilon + n_3 \cdot 3\varepsilon + \dots + n_n \cdot n\varepsilon$, donde $n_1, n_2, \dots, n_n$ representan respectivamente el número de partículas que poseen las energías $1\varepsilon, 2\varepsilon, \dots, n\varepsilon$. (con $n_1 + n_2 + \dots + n_n = N$).

Con $\varepsilon = 1$, la energía total viene dada por: $E_T = n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 2 + n_3 \cdot 3 + \dots + n_n \cdot n$

A diferencia del applet anterior, esta simulación no presenta una secuencia temporal. Sólo muestra, para diferente número de partículas N y de valores de energía total E_T , todas las configuraciones posibles, y los diferentes modos (diferentes microestados) en que las partículas pueden disponerse en cada configuración. En este caso, los microestados están caracterizados en términos de la energía, sin ninguna referencia a coordenadas espaciales.

Objetivos

- Observar las diferentes configuraciones (macroestados) de las partículas respecto de la ocupación de los niveles de energía y los microestados asociados a cada una de ellas.
- Reconocer el macroestado de mayor probabilidad ($\Omega_{\max}$) y asociarlo con la situación de equilibrio.
- Interpretar las fluctuaciones en el equilibrio a partir de las probabilidades de los diferentes macroestados.

Actividades:

3.1. Análisis de algunos casos

a) Trabajando con 4 partículas y una energía total igual a 8, analice todas las configuraciones posibles; el número de microestados correspondientes a cada configuración y complete la siguiente tabla: En cada caso capturar las imágenes que correspondan; insertarlas en la hoja y discutir la distribución

	Macroestado	Número de microestados (Ω)	Probabilidad
I	3, 0,0,0,1	4	
II			
III			
IV			
V			
Número Total de microestados			

(*) **3,0,0,0,1** indica que el macroestado I corresponde a la siguiente distribución de las partículas: 3 partículas en el nivel 1 y una partícula en el nivel 5.

- b) El applet sólo muestra hasta un máximo de cinco partículas y energía igual a 11. Capturar las imágenes para esa distribución y analizar los resultados obtenidos. Calcular Ω .

3.2. Análisis de 6 partículas con Energía Total 12

Para valores mayores, los números se hacen muy grandes, pero aparece una situación interesante. La tabla muestra las 11 distribuciones posibles en el caso en que $N=6$ y $E_T= 12$

	Macroestado	Número de microestados (Ω)	Probabilidad
I	5,0,0,0,0,1	6	
II	4,1,0,0,0,1,0	30	
III	4,0,1,0,1,0,0	30	
IV	3,2,0,0,1,0,0	60	
V	4,0,0,2,0,0,0	15	
VI	3,1,1,1,0,0,0	120	
VII	2,3,0,1,0,0,0	60	
VIII	3,0,3,0,0,0,0	20	
IX	2,2,2,0,0,0,0	90	
X	2,3,0,1,0,0,0	30	
XI	0,6,0,0,0,0,0	1	
Número Total de Microestados		462	

Se observa que hay una configuración que tiene un número de microestados notablemente más grande que las otras, y, por lo tanto, una probabilidad mucho más alta. Llamaremos a ésta configuración: configuración más probable, y es a la que puede asociarse un mayor número de microestados. En el caso indicado en la tabla, la configuración VI tiene una probabilidad del orden del 26 % $[(120/462)*100]$.

Supongamos entonces, que el sistema se hubiera preparado de modo tal que se encontrara inicialmente en el macroestado II, y que luego las partículas (por razones internas, como por ejemplo, interacciones entre ellas), pudieran cambiar de nivel, manteniendo el sistema aislado, es decir, sin modificar su energía total. El sistema podría estar entonces en cualquiera de sus 462 microestados, pasando sucesivamente por cualquiera de ellos. Sin embargo, como el macroestado VI es el más probable, el sistema se encontrará la mayor parte del tiempo en alguno de los 120 microestados correspondientes a él. Ese macroestado (donde $\Omega = \Omega_{\max}$) suele denominarse macroestado de equilibrio.

Considerando lo analizado, responder las siguientes cuestiones:

- En el caso anterior, y suponiendo que el sistema está en equilibrio, ¿puede el sistema estar en algún momento en el macroestado (2,2,2,0,0,0,0)? ¿y en el (5,0,0,0,0,0,1)? ¿Cuántas más chances tiene el sistema de estar en el primero respecto del segundo?.
- Si el sistema se encuentra en equilibrio, puede pasar de un microestado a otro? Si es así, ¿esto produce efectos macroscópicos o cambios macroscópicos en el sistema? ¿Cómo incide en la respuesta el número de partículas N que constituyen

el sistema? Piense en el análisis de las fluctuaciones realizado en la actividad de las moléculas en una caja.

- iii) En el caso considerado, el macroestado de equilibrio incluye el 27% del total de microestados del sistema. Si consideramos otro sistema con mayor número de partículas, que piensa que ocurrirá con ese porcentaje? ¿aumenta, disminuye o se mantiene en torno a ese valor?. Justifique su respuesta.