

4.

RESULTADOS

Neste capítulo apresentaremos e discutiremos as respostas dos alunos aos testes de conhecimento prévio e posterior ao ensino da disciplina Físico-Química I. Do contraste entre essas informações procuraremos evidenciar a facilitação da aprendizagem significativa da termodinâmica por nossa proposta de ensino.

O conhecimento prévio ao ensino foi avaliado por meio das respostas ao questionário apresentado no Apêndice 3, das quais extraímos conceituações de energia, energia interna, calor e trabalho e resoluções de problemas. Os alunos também confeccionaram mapas conceituais em que identificamos os modos pelos quais estruturaram os conceitos da primeira lei da termodinâmica (energia, energia interna, calor e trabalho) e como os relacionavam.

Experimentamos nossa proposta de ensino em três turmas diferentes, uma a cada semestre nos quais ensinamos a disciplina. Também tivemos oportunidade de aplicar o questionário noutra turma em que não atuamos como professor, aumentando o número de informações sobre os conceitos e os problemas. Por falta de tempo não foi possível construir mapas conceituais com este quarto grupo de alunos.

O conhecimento dos alunos após o ensino foi avaliado através de mapas conceituais e resolução de problemas nas provas da disciplina. A comparação entre os mapas conceituais prévios e posteriores ao ensino permite verificar a ocorrência de mudanças de hierarquia e de significado dos conceitos da primeira lei da termodinâmica. A comparação entre os modos de resolver problemas, revela relações entre conceitos termodinâmicos e entre descrições textuais e matemáticas de fenômenos estudados pela termodinâmica, antes e após o ensino.

4.1 CONCEITOS DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA PRÉVIOS AO ENSINO

4.1.1 CONCEITO DE ENERGIA

A conceituação da energia apresentou sérias dificuldades. Cerca de 48% dos alunos afirmou desconhecer ou não lembrar o que é energia, ou não deu qualquer resposta. Isto se deveu, em parte, ao fato do teste aplicado ser constituído por questões abertas, permitindo que os termos não fossem conceituados, embora houvesse sido solicitado aos alunos que buscassem de algum modo exprimir os conceitos pedidos. Os estudos sobre concepções de energia de alunos, em geral, empregam questões com alternativas, induzindo a algum tipo de resposta ^[97].

A negação de exprimir o que seja energia, um termo de tão ampla e freqüente aplicação no cotidiano, nos leva a inferir que se trata mais de uma atitude de preservação dos alunos, evitando expor-se, que da ausência do conceito. Examinando as respostas dos outros estudantes (abaixo) podemos notar suas dificuldades de emprego da linguagem, constatada na totalidade dos alunos durante as aulas de discussão de problemas. Aqueles que preferiram não conceituar energia teriam tido mais dificuldade de organizar suas idéias a respeito, no momento do teste.

As demais respostas podem ser agrupadas em algumas categorias, mostrada na Figura 4-1 e discutidas a seguir.

^[97] Ver, por exemplo, TRUMPER, Ricardo. A survey of conceptions of energy of Israeli preservice high school biology teachers. *International Journal of Science Education*, v.19(1), p. 31-46, 1997.

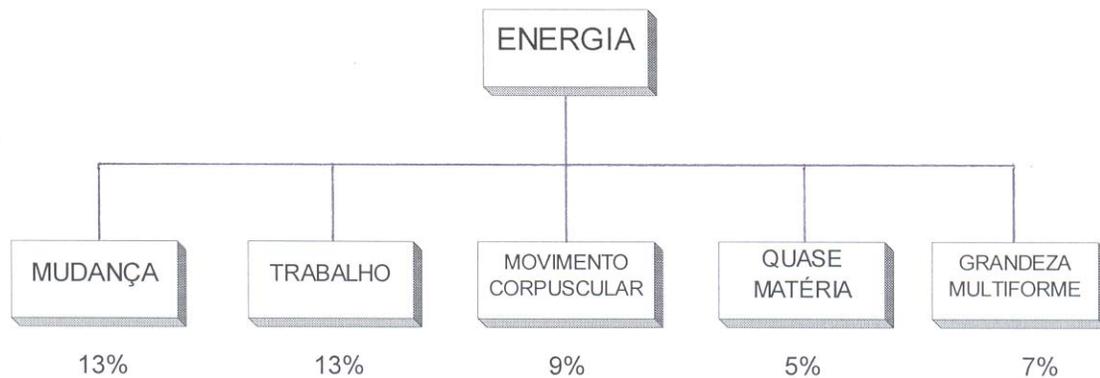


FIGURA 4-1: CONCEPÇÕES DOS ALUNOS SOBRE ENERGIA

1. MUDANÇA

Vários alunos associaram a energia com mudança, modificação ou transformação de um sistema [⁹⁸]:

- Energia é um ente capaz de mudar o comportamento físico e/ou químico de um determinado sistema.
- *Grandeza física capaz de modificar o estado de um corpo.*
- *É tudo. Para que ocorra qualquer processo é preciso energia.*
- *É tudo que pode produzir deslocamento num [corpo?] como o calor e o trabalho.*

A energia é vista como um agente das mudanças que podem suceder nos sistemas. A ausência de outras características da energia é compensada por uma conceituação de grande amplitude mas, altamente imprecisa. É o tipo de conceito encon-

[⁹⁸] As transcrições de respostas dos alunos foram grafadas em itálico. Eventuais incorreções de linguagem estão como nos originais.

trado em livros do ensino fundamental por exemplo [⁹⁹]: “Sempre que acontece algo com a matéria existe participação de energia. Podemos dizer, de forma simples, que a energia é algo capaz de produzir um esforço, um trabalho, um movimento, uma mudança na matéria.”

A mudança também é vista sob a forma da entrada e saída de algo, liberação/perda ou absorção/ganho de energia:

- É algo que por influência do ambiente é ganho ou é perdido.
- É algo que pode ser liberada ou absorvida.
- É a forma sob a qual o calor é liberado.
- É qualquer manifestação gerado num processo. Por exemplo: a explosão de uma bomba libera energia; o aquecimento da água libera energia calorífera.

Estas últimas respostas são semelhantes às encontradas por Watts [¹⁰⁰] e identificadas como “produto”, pelo fato da energia aparecer como resultado de um processo. A noção de armazenagem da energia também se encontra presente, de modo implícito, o que pode servir de âncora para o ensino do conceito de energia interna.

Por outro lado, a liberação e a absorção de energia são interpretáveis como transferências de energia entre sistema e vizinhanças, podendo vir a facilitar o ensino dos conceitos de calor e trabalho.

2. TRABALHO

A conhecida definição mecanicista de energia como *capacidade de realizar trabalho* aparece como resposta majoritária nessa categoria. Algumas variações desse ti-

[⁹⁹] SILVA JR., César da, SASSON, Sezar, SANCHES, Paulo Sérgio Bedaque. *Ciências: entendendo a natureza*. 3ª ed. São Paulo : Saraiva, 1993.

[¹⁰⁰] WATTS. D. Michael. Some alternatives views of energy. *Physics Education*, v.18, p. 213-217, 1983.

po de associação apresentada pelos estudantes são:

- Algo que realiza trabalho.
- É tudo aquilo que proporciona trabalho, como no caso de um processo isotérmico em que calor é convertido em trabalho.
- É algo ao qual podemos associar trabalho, que é seu equivalente mecânico.

Há quem defina energia como quantidade de trabalho

- É o valor do trabalho necessário para levar um sistema de um estado inicial a outro.

ou como potência

- É a quantidade de trabalho realizado num espaço de tempo.

A definição da energia a partir do trabalho é difundida por livros didáticos de física [101] e química [102] para o ensino médio, embora também em nível universitário a energia seja introduzida como um conceito mecânico, para depois ser diferenciado, englobando o calor como uma das formas de energia [103]. Esta é, possivelmente, a causa para que os alunos apresentem esta concepção de energia.

Em defesa dessa abordagem Warren afirma que a energia “só pode ser compreendida se o estudante antes domina várias idéias básicas difíceis (particularmente força e trabalho, e o conceito geral de conservação) e possui um extenso conheci-

[101] MÁXIMO, Antônio, ALVARENGA, Beatriz. *Física*. São Paulo : Scipione, 1997. p. 237.

[102] FELTRE, Ricardo. *Química*. 4ª ed. São Paulo : Moderna, 1994. v.2, p. 128.

[103] RESNICK, Robert. Op. Cit., v.1 e v.2.

mento de física elementar” [104].

Por outro lado há os que se opõem a esta posição, defendendo o ensino da energia como um conceito primitivo, construído com base na idéia de conservação (Sexl [105], Duit [106], Sevilla Segura [107], Lehrman [108]), com o que concordamos.

Vários são os argumentos apresentados a favor de uma conceituação descritiva da energia, aos quais acrescentamos que:

(a) A definição de energia como capacidade de realizar trabalho é fisicamente inconsistente, pois energia não é uma capacidade que diminui — como se deduz da segunda lei da termodinâmica — mas, uma propriedade que se conserva.

(b) Definir a energia no contexto limitado da mecânica para depois ampliá-lo incluindo os fenômenos térmicos, eletromagnéticos e óticos, é psicologicamente inadequado porque consiste em ensinar do particular para o geral, abrindo mão do poder organizador que o conceito de energia possui. Como nos referimos anteriormente, não se trata de ensinar história da ciência: primeiro a mecânica, depois a termodinâmica mas, de trabalhar no sentido da aprendizagem dos conceitos mais gerais, amplos, com poder estruturante, unificador, em primeiro lugar, de modo a facilitar a aprendizagem dos conceitos específicos depois. Não há dúvida que o conceito de energia é mais geral que o conceito de trabalho.

3. MOVIMENTO CORPUSCULAR

Entre as respostas dos alunos relacionando energia e movimento corpuscular é mais freqüente a referência à vibração ou a agitação das moléculas do sistema:

[104] WARREN, J. W. The nature of energy. *European Journal of Science Education*, v.4(3), p. 295-297, 1982.

[105] SEXL, Roman U. Some observations concerning the teaching of the energy concept. *European Journal of Science Education*, v.3(3), p. 285-289, 1982.

[106] DUIT, Renders. Understanding energy as a conserved quantity - remarks on the article of R. U. Selx. *European Journal of Science Education*, v.3(3), p. 291-301, 1982.

[107] SEVILLA SEGURA, C. Reflexiones en torno al concepto de energía. Implicaciones curriculares. *Enseñanza de las Ciencias*, v.4(3), p. 247-252, 1986.

- Medida de vibração das moléculas.
- Grau de vibração das moléculas de um sistema.
- Termo utilizado para quantizar o grau de agitação das partículas de uma certa porção de matéria.

Outros tipos de associação ocorrem com choques de partículas, movimento e interação moleculares:

- É o choque entre as partículas quando submetidas a um aumento de temperatura.
- Conjunto caracterizado por partículas e seu movimento.
- Capacidade que moléculas, átomos ou qualquer outra espécie possui de locomover e interagir com outras espécies.

Na disciplina de Física Geral anterior à de Físico-Química há um capítulo sobre teoria cinético-molecular da matéria aplicada aos gases. Nessa teoria, a energia interna de um gás é identificada com a energia cinética das partículas que o constituem, provável razão para o aparecimento dessa concepção de energia entre as respostas dos alunos.

A existência de alguma relação entre energia e movimento das moléculas, apesar da precariedade das conceituações expostas, pode servir de ponto de partida para o ensino da energia interna como a soma das energias cinéticas moleculares com a energia de interação das moléculas. Embora o ensino da termodinâmica seja predominantemente fenomenológico, não pode prescindir de algumas interpretações com base em modelos corpusculares da matéria, como as variações de temperatura que ocorrem em expansões e compressões adiabáticas, por exemplo.

[¹⁰⁸] LEHRMAN, Robert L. Energy is not the ability to do work. *The Physics Teacher*, v.11(1), p. 15-18, 1973.

4. MATÉRIA ou QUASE-MATÉRIA

As respostas incluídas nessa categoria referem-se à energia como substância ou com atributos quase-materiais:

- Energia seria uma “substância” que pode ser armazenada ou transformada em trabalho, calor e outras formas de energia.
- É a essência primária do universo que o compõe em todas as suas formas e estados de agregação.
- A definição física é a seguinte: matéria descondensada.
- É uma grandeza inerente a qualquer coisa que forma massa.

A materialização ou quase-materialização da energia é um fato conhecido na pesquisa sobre as concepções dos alunos [¹⁰⁹], havendo mesmo quem advogue seu ensino com base nessa idéia [¹¹⁰]. O conceito de energia como substância não se restringe aos alunos, mas é também encontrado em livros de ciências do ensino fundamental [¹¹¹] e ao longo da história da física [¹¹²] como, por exemplo, os conceitos de calórico e fluido elétrico.

Um exame da estrutura dos conceitos de energia e de matéria, do ponto de vista fenomenológico [¹¹³], nos mostra que ambos possuem atributos como: conservação,

[¹⁰⁹] HIERREZUELO, José, MONTERO, Antonio. *La ciencia de los alumnos*. Barcelona : Laia/MEC, 1989. p.139.

[¹¹⁰] SCHIMID, G. Bruno. Energy and its carriers. *Physics Education*, v.17, p. 212-218, 1982.

[¹¹¹] LEMBO, Antônio, MOISÉS, Hélvio, SANTOS, Thaïs. *Ciências: o corpo humano*. São Paulo : Moderna, 1992. p. 51-52.

[¹¹²] DUIT, Renders. Should energy be illustrated as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, v.9(2), p.139-145, 1987.

[¹¹³] SILVA, José Luis P. B., RESINES, Jose A., DE LA FUENTE, Maria Tereza. La diferenciación entre materia y energía en la enseñanza secundaria. *Anales del 2º Simposio sobre La Docencia de las Ciencias Experimentales en la Enseñanza Secundaria*. Madrid : Colegio Oficial de Biólogos, 1998. p.175-177.

conversão, transferência, contenção, multiformidade propiciando que os mesmos termos sejam utilizados na descrição de transformações materiais e energéticas. Como, em geral, os dois tipos de transformação estão associados, a própria descrição do fenômeno pode induzir à idéia da energia como algo quase-material.

5. GRANDEZA MULTIFORME

Algumas das conceituações apresentadas pelos alunos atribuem à energia a característica de apresentar-se de diversas formas interconvertíveis:

- Termo geral pois a mesma é interconvertível em várias formas de energia.
- Existe vários tipos: sonora, química, elétrica, potencial. É transferida, transformada de um tipo para outro.
- Energia é uma forma de calor, que pode ser usada para realizar trabalhos, ser transformada de um tipo para outro.

Esta concepção de energia, provavelmente oriunda dos estudos de Física Geral e Química Geral, contém duas de suas características cientificamente aceitas: a multiformidade e a conversão. Em nosso entender a posse desse conceito é um elemento facilitador da aprendizagem do conceito científico de energia, porque em nosso ensino justificamos sua conservação pela conversão das formas de energia, de acordo com o argumento desenvolvido por Mayer ^[114] em seu histórico artigo sobre a conservação da energia.

Em resumo, as concepções dos alunos sobre energia referem-se a mudança,

[114] MAYER, Julius Robert. On the forces of inorganic nature. In: In: LINDSAY, Robert Bruce (ed.). *Energy: historical development of the concept*. Stroudsburg : Dowden, Hutchinson & Ross, [1975?]. 369 p. il. (Benchmark Papers on Energy, 1). p. 277-278.

trabalho, movimento molecular, matéria e multiformidade. De todas as respostas obtidas apenas 5% não puderam ser categorizadas desse modo. O número das categorias que se apresentaram em cada semestre investigado variou entre duas e cinco, conforme o número de estudantes que responderam ao teste de conhecimento prévio. O critério empregado para a seleção foi o comparecimento da concepção por mais de uma vez.

Os dados mostram que os alunos ingressos na disciplina Físico-Química I durante o período investigado não possuíam o conceito científico de energia, cuja estrutura é mostrada na Figura 3-3. Nenhuma das respostas referiu-se à conservação, da energia, seu principal atributo. Outras características gerais da energia — contenção, transferência, conversão e multiformidade — pouco foram citadas e, algumas vezes, apenas de modo implícito.

4.1.2 CONCEITO DE ENERGIA INTERNA

O conceito de energia interna é conhecido da maioria dos alunos. Sua ausência nas respostas dos testes foi de 20%. As concepções externadas (exceto 6%) foram agrupadas nas seguintes categorias:

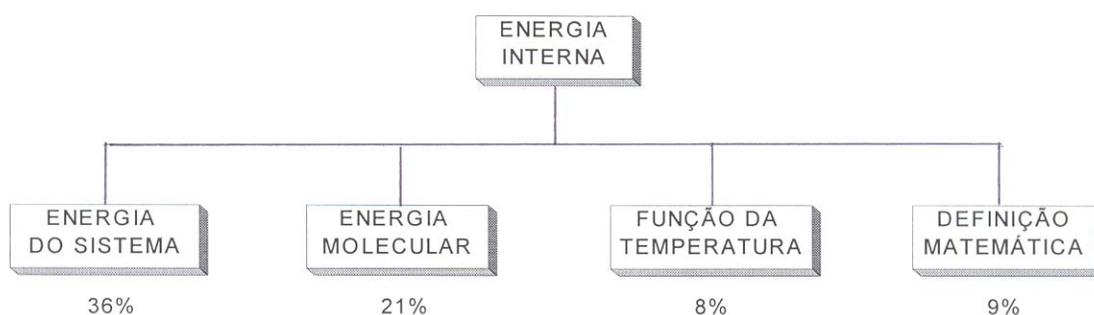


FIGURA 4-2: CONCEPÇÕES DOS ALUNOS SOBRE ENERGIA INTERNA

1. ENERGIA DO SISTEMA

Os alunos concebem, majoritariamente, a energia interna como a energia do sistema. Alguns exprimem sua idéia de maneira direta:

- Energia de um sistema fechado.
- Energia contida em um corpo.
- Energia dentro de um sistema.

porém, a variedade das respostas demonstra a pluralidade de significados que o qualificativo interna, associado à energia, evoca nos alunos: energia intrínseca (*Energia intrínseca dos corpos.*), energia possuída (*É a energia que um sistema possui, não podendo ser medida, somente pode ser medida a sua diferença uma vez ocorrido algum processo no sistema.*), energia contida (*É a energia característica contida no interior de um sistema.*), energia própria, energia armazenada (*Energia própria, armazenada, em cada corpo.*), energia disponível (*Energia disponível em um corpo.*), energia total (*Energia total de um sistema.*).

Esta concepção é bem adequada aos nossos propósitos, pois consideramos a energia interna, do ponto de vista fenomenológico, como a energia possuída pelos sistemas em virtude de sua existência material (ver Apêndice 1). Ademais, a idéia de contenção da energia que os alunos possuem é bem clara e certamente contribuirá na construção de um conceito superordenador de energia.

2. ENERGIA DAS MOLÉCULAS DO SISTEMA

A segunda concepção mais freqüentemente manifesta pelos alunos é que a energia interna está associada às moléculas que compõem o sistema. Como já vimos, uma relação desse tipo ocorre também com o conceito de energia.

Convém notar que nas respostas dessa categoria, a palavra molécula é predominante em relação a outros termos, como partícula, por exemplo. Isso revela a influência do modelo cinético-molecular da matéria na conceituação da energia interna, pois como assinalado anteriormente, esse modelo é estudado nas disciplinas que são requisitos para Físico-Química I.

A maior parte das respostas refere-se ao movimento molecular

- Energia existente dentro de um sistema, gerada pelo movimento das espécies presentes no mesmo e pode sofrer influência externa.
- É a energia inerente a um determinado material, devido aos movimentos das partículas que o compõem.

que também pode ser entendido como agitação ou vibração

- É proporcional ao grau de agitação molecular de um sistema (internamente)
- Agitação interna das moléculas do sistema.
- Energia de um sistema num ambiente fechado. Energia de uma molécula que faz ela “vibrar” quando recebe energia.
- É o somatório das energias relacionadas com uma determinada quantidade de matéria (vibração das moléculas, etc.).

Alguns poucos possuem um conceito mais elaborado, em que a grandeza macroscópica é interpretada microscopicamente como energia cinética e potencial:

- Energia inerente do sistema devido ao movimento de suas moléculas e a energia potencial existente entre elas.

- Energia de um sistema que está ligada ao distanciamento entre as partículas e à agitação das mesmas.

A interpretação molecular da energia interna é necessária para o entendimento de alguns fenômenos de interesse, como as variações de temperatura decorrentes de uma variação de volume ou de uma reação química que ocorre em um sistema. A existência de algum tipo de associação entre energia interna e energia das moléculas do sistema é o ponto de partida para o ensino do conceito de energia interna como energia de movimento e interação molecular.

3. ENERGIA COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Essa concepção possivelmente tem sua origem na aprendizagem de aspectos quantitativos da teoria cinético-molecular e da termodinâmica nas disciplinas anteriores, como pode ser inferido das seguintes afirmativas:

- Num sistema, é a energia onde está envolvida a variação da temperatura. Através de uma série de considerações de ordem microscópica podemos chegar à que $U = (3/2) nRT$ onde U : energia interna, R : constante dos gases e T : temperatura. Macroscopicamente temos que $U = Q - W$; onde Q : calor e W : trabalho.
- Em um sistema onde existe troca de calor e variação de temperatura, a energia interna depende da temperatura, quando não há variação de temperatura energia interna = 0.

A primeira resposta é uma interpretação resultante da teoria cinética dos gases. A segunda decorre da aprendizagem mecânica de que a variação da energia interna do gás

ideal é função apenas da temperatura, como também se verá nas resoluções dos problemas do teste de conhecimento prévio.

Outras respostas são menos precisas no que toca à relação entre energia interna e temperatura:

- Energia associadas as variações de temperatura do sistema.
- É uma variável de estado que está amarrada à temperatura.

De todo modo, a idéia de que a energia interna é uma função, ainda que imprecisa e que se refira a apenas uma variável, serve de esteio para o futuro ensino dos aspectos formais da termodinâmica.

4. DEFINIÇÃO MATEMÁTICA

Um quarto tipo de concepção é que a energia interna é tão somente uma variável computacional necessária na termodinâmica. Desse modo sua conceituação seria apenas matemática:

- Energia interna não é energia interior; é a energia de cuja variação é representada pela quantidade de calor e o trabalho produzido no sistema.
- Se temos um corpo e fornecemos a ele uma quantidade Q de calor e ele realiza um trabalho W , a energia interna do corpo é dada por $\Delta U = Q - W$, ela é a diferença entre o calor fornecido e o trabalho realizado por um sistema.
- É a diferença entre a quantidade de calor fornecido e o trabalho realizado pelo sistema.

Essa idéia poderia ser obstáculo à aprendizagem da termodinâmica macroscópi-

ca porque utilizamos de conceitos construídos com a finalidade de descrever fenômenos observáveis. A descrição matemática peca pela pobreza da explicação, restrita aos aspectos quantitativos. Sem a compreensão que existe uma grandeza energética vinculada à natureza e aos estados dos sistemas, determinados estes pelos arranjos moleculares, os mecanismos pelos quais ocorrem as transformações ficam difíceis de modelar e explicar.

Todavia, em vista da ausência de defesa dessa concepção em sala de aula, o mais certo é que esse tipo de resposta não se constitua numa posição epistemológica dos alunos mas, reflita apenas o conhecimento de expressões matemáticas aprendidas mecanicamente em outras disciplinas.

Enfim, as concepções prévias dos alunos acerca da energia interna não dificultam seu ensino, podendo servir de âncora para a introdução do conceito descritivo que desejamos ver aprendido.

4.1.3 CONCEITO DE TRABALHO

As concepções dos alunos acerca do trabalho foram mais diversificadas do que seria de se esperar depois de haver cursado uma disciplina de mecânica e alguns tópicos de termodinâmica. Do total de respostas, agrupamos 68% em duas categorias: energia e força-deslocamento. Outras (18%) relacionaram o trabalho com uma variedade de conceitos tais como: capacidade, processo, quantidade de calor, transferência de calor, esforço, fenômeno, expansão e compressão, variação de volume, mudança de estado. A abstenção de respostas foi de 14%.

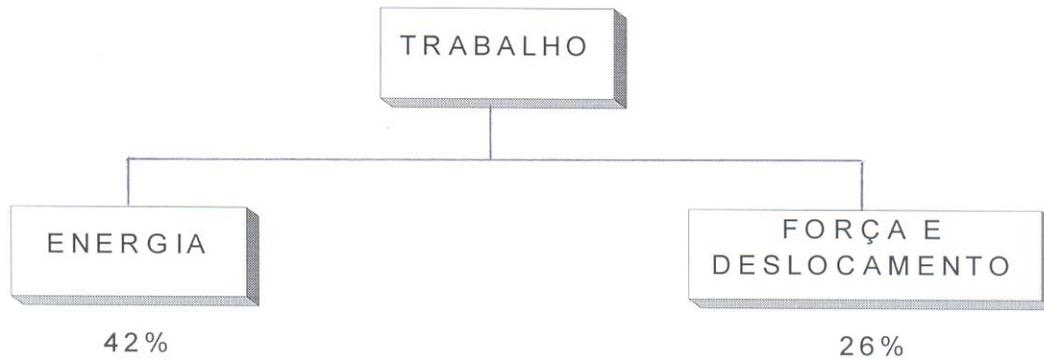


FIGURA 4-3: CONCEPÇÕES DOS ALUNOS SOBRE TRABALHO

1. ENERGIA

A maioria dos alunos conceituou trabalho como energia, por exemplo:

- Energia útil de um corpo.
- Energia despendida ou ganha por um sistema.
- É a energia que estava acumulada e que foi transformada ou transferida para outra posição ou estado.

Alguns procuraram ser mais específicos, explicitando uma finalidade para a energia. Assim, o trabalho pode ter como objetivo a produção de movimento

- É a energia gasta para que um corpo se desloque.
- Energia necessária para tornar um sistema dinâmico.
- É o fluxo de energia de um ponto para outro, capaz de produzir movimento.

ou uma mudança de estado

- Energia usada para deslocar um sistema de um estado a outro.
- É a quantidade de energia gasta para modificar o estado de um sistema, ou utilizada pelo sistema sobre a vizinhança.

ou, o trabalho é vagamente associado a um processo

- Energia gasta para realizar um processo.
- É a energia necessária para a realização de um processo.
- Energia gasta para acontecer algum processo. Pode ser positivo ou negativo.
- Aproveitamento de energia, para a realização de alguma atividade.

Um aspecto comum à grande parte das respostas dessa categoria é a visão do trabalho como energia consumida (*gasta, necessária, usada, utilizada*) para a realização de algo. Apenas uns poucos alunos detêm a noção de diminuição e aumento da energia do sistema a partir da realização de trabalho, seja de modo explícito

- Energia cedida ou absorvida para levar um sistema do estado inicial a um estado final.
- Energia absorvida ou liberada que implica na modificação do sistema, dependendo apenas do seu estado inicial e final.

ou implícito

- Trabalho é a variação de energia cinética, também é de configuração de um sistema.

- Medida da variação de energia de um sistema.
- Trabalho é um conceito físico. Nada mais é que a medida da variação de energia de um sistema.

Um número expressivo de alunos conceituou trabalho como forma de energia. Além disso, suas concepções distinguem-se das anteriores por não incluir a idéia de que o trabalho se destina a um fim.

- É toda forma de energia que não envolve calor ou não envolve temperatura.
- Forma de energia que flui através das fronteiras de um sistema devido a uma variação mecânica.
- Forma de energia que se realiza um sistema.
- É uma forma de energia. Na termodinâmica só se tem trabalho quando há variação de volume.

A concepção de trabalho como energia ou forma de energia pode ser empregada como referência no ensino do conceito de energia pois, os diferentes tipos de trabalho — de transporte de massa, de transporte de carga, etc. — representam formas de energia que dão sentido à idéia de conversão e por extensão, de conservação da energia.

Entretanto, o significado mais amplo de trabalho é como processo de transferência de energia: “trabalho é energia transferida, sem transferência de massa, através da fronteira de um sistema devido a uma diferença de uma propriedade intensiva diversa da temperatura que exista entre sistema e vizinhança” [¹¹⁵].

[¹¹⁵] OBERT, Edward F. *Concepts of thermodynamics*. New York : McGraw-Hill, 1960. p. 35.

Este é um conceito vinculado à equação fenomenológica $\Delta U = Q - W$, cuja leitura nos informa que a energia interna de um sistema fechado pode variar por calor — “transferência de energia, sem transferência de massa, através da fronteira de um sistema devido a uma diferença de temperatura entre sistema e vizinhança” [116] — ou por trabalho, que representa uma variedade de modos de transferir energia que possuem outras causas diferentes da temperatura. Por exemplo, se a causa é uma diferença de pressões entre sistema e vizinhança, ocorre trabalho mecânico (de variação de volume), se uma diferença de potenciais elétricos, ocorre trabalho elétrico (de transporte de carga), se uma diferença de tensão interfacial, ocorre trabalho mecânico (de variação de superfície), e assim por diante, cada tipo de trabalho associado a uma causa distinta.

Apenas 4% dos alunos conceituaram trabalho como processo porém, de modo inadequado

- É um processo físico ou químico onde se libera energia ou recebe energia.
- É um processo realizado através de energia, relacionado com a pressão e o volume de um determinado corpo ou meio.
- Processo no qual se gasta energia.

Embora a idéia de formas de energia tenha sentido na construção fenomenológica do conceito de energia, uma vez aceita a conservação da energia e introduzido o conceito de transferência de energia, o trabalho adquire múltipla significação. Essa polissemia traz, obviamente, problemas à aprendizagem significativa que devem ser enfrentados no campo epistemológico, explicando-se a evolução conceitual da termodinâmica.

[116] Ibd., p. 34.

Contudo, há quem advogue a substituição do termo trabalho por outro como “variação na energia das vizinhanças mecânicas” [117], ou simplesmente o ignore operando com variação de energia mecânica [118]. O que os dois autores parecem esquecer é que o contexto científico é uma diferenciação do contexto social. Assim, o conceito mais amplo de trabalho se dá no nível social, polissêmico, comportando especificidades em várias áreas de estudo e no senso comum. Abolir o termo trabalho do jargão termodinâmico é negar-se à discussão da interpenetração dos diversos tipos de conhecimento que ocorrem no âmbito social. É, no mínimo, uma atitude irrealista de pretender fazer da termodinâmica um corpo de conhecimento isolado.

2. FORÇA E DESLOCAMENTO

As respostas constantes dessa categoria estabelecem, simultaneamente, relações do trabalho com força e deslocamento

- É a relação entre força e deslocamento.
- Quando uma força provoca o deslocamento de um corpo.
- É a quantidade necessária para promover um certo deslocamento em um sistema sob determinada força.

apenas, com força

- É uma força aplicada a um meio capaz de provocar um deslocamento.
- É a ação de uma força sobre determinado corpo produzindo movimento.
- Trabalho é a força exercida pelo ou sobre o sistema pelo deslocamento.

[117] BARROW, Gordon M. Thermodynamics should be built on energy — not on heat and work. *Journal of Chemical Education*, v.65(2), p. 122-125, 1988.

[118] KEMP, H. R. The concept of energy without heat or work. *Physics Education*, v.19(5), p. 234-240, 1984.

ou somente com deslocamento

- Deslocamento exercido ou sofrido por um sistema sob a ação de uma força.
- É o deslocamento de uma força que age no sistema.

Estas concepções certamente resultam da aquisição incompleta da definição quantitativa de trabalho estudada na disciplina de mecânica. Pouquíssimos alunos demonstram o estabelecimento de relações conceituais entre força e deslocamento consistentes com a definição formal do trabalho

- É uma das formas mais comuns de variação de energia e pode ser expressa como produto entre força e deslocamento.
- É a relação entre força e deslocamento. É a energia produzida pelo deslocamento devido a uma força aplicada.
- Tudo onde temos uma força aplicada e obtemos um deslocamento. Onde há gastos de energia.

Alguns estudantes relacionaram força e deslocamento de modo puramente matemático, sem referir-se a qualquer processo, como nas outras respostas.

- Trabalho é o produto escalar de uma força por um dado deslocamento.
- É o produto da projeção da força na direção do deslocamento pelo deslocamento. A integral da força pelo deslocamento.
- $W = \int F(x) dx$ ou $W = \int F \cdot dl$ onde dl é o vetor tangente à trajetória.

As concepções apresentadas apontam para a necessidade de se esclarecer as relações entre trabalho, força e deslocamento de um corpo material.

4.1.4 CONCEITO DE CALOR

Calor é um conceito termodinâmico difícil. Segundo Schenberg [119], “o calor (...) continua sendo ainda, em muitos aspectos fundamentais, uma coisa bastante misteriosa; a mecânica estatística, apesar de ter tido um desenvolvimento surpreendente com a mecânica dos quanta, ainda não conseguiu esclarecer o crescimento da entropia.”

Schenberg fala de dificuldades sentidas não somente pelos alunos. Lewis e Randall [120], em seu clássico livro sobre termodinâmica química afirmam que “existem dois termos, calor e trabalho, que tiveram um importante papel no desenvolvimento da termodinâmica mas, cujo uso freqüentemente introduz um elemento de imprecisão em uma ciência capaz da maior precisão.” Barrow faz coro e chega ao ponto de, na quarta edição de seu livro-texto [121], substituí-los por energia térmica e energia mecânica.

Essa atitude, entretanto, não elimina os termos calor e trabalho da termodinâmica e muito menos, as concepções termodinamicamente errôneas que os alunos possuem e são as causas das dificuldades que se quer resolver. Se queremos facilitar a aprendizagem significativa da termodinâmica não podemos evitar desenvolver o ensino a partir do conhecimento que os alunos possuem.

[119] SCHENBERG, Mário. *Pensando a física*. 4a ed. São Paulo : Nova Stella, 1990. p. 65.

[120] LEWIS, Gilbert Newton, RANDALL, Merle. *Thermodynamics*. 2nd ed. Revised by Kenneth S. Pitzer and Leo Brewer. New York : McGraw-Hill, 1961. p. 34.

[121] BARROW, Gordon M. *Physical Chemistry*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 1979.

O calor, semelhantemente ao trabalho, possui mais de um significado no contexto da termodinâmica. O primeiro, historicamente falando, é de forma de energia, que dá suporte à conservação: durante as mudanças que ocorrem na natureza a energia é conservada porque se transforma.

Um segundo significado é de processo de transferência de energia devido, exclusivamente, à diferença de temperatura das duas regiões entre as quais ocorre o processo. Este conceito possivelmente deriva da idéia de calor como movimento molecular, presente entre mecanicistas como Joule e Clausius que desenvolveram o conceito de energia. Uma vez que se pode descrever um mecanismo de condução de calor por transferência de movimentos moleculares, o calor não seria a energia cinética transferida mas, o processo de transferência.

Embora sejamos partidários do conceito de calor como processo, não podemos evitar a discussão do calor como forma de energia, não só pela opção em expor a construção histórica dos conceitos termodinâmicos que fizemos mas, principalmente, porque essa concepção é freqüente entre os alunos. É preciso esclarecer as relações que cada conceito de calor estabelece com os demais conceitos termodinâmicos.

A discussão sobre que conceito de calor ensinar vem atravessando os anos [122], com argumentos a favor de cada uma das posições. Se a pretensão é ensinar para a aprendizagem significativa, a polarização apenas prejudica, pois desconsidera o conhecimento que os alunos trazem consigo.

Apenas 5% dos alunos não conceituaram calor ou afirmaram não lembrar e não saber o que responder.

[122] Ver, por exemplo, WARREN, J. W. The teaching the concept of heat. *Physics Education*, v.7, p. 41-44, 1972. GARCIA HOURCADE, J. L., RODRIGUEZ DE AVILA, C. Preconcepciones sobre el calor en 2o de B.U.P. *Enseñanza de las Ciencias*, v.3, p.188-193, 1985. MICHINEL MACHADO, J. L., D'ALESSANDRO MARTÍNEZ, A. El concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, v.12(3), p. 369-380, 1994.

Diferentemente do que ocorre no ensino fundamental e no ensino médio em que as concepções de calor estão mais relacionadas com o uso cotidiano do termo [123], as respostas dos alunos contêm, predominantemente, associações entre calor e energia. O fato revela a percepção dos estudantes de que no contexto escolar o calor possui significado diferente daqueles da vida diária. Apenas uns poucos conceituaram explicitamente calor como temperatura. Somente 3% das respostas não puderam ser encaixadas nas categorias que apresentamos a seguir.

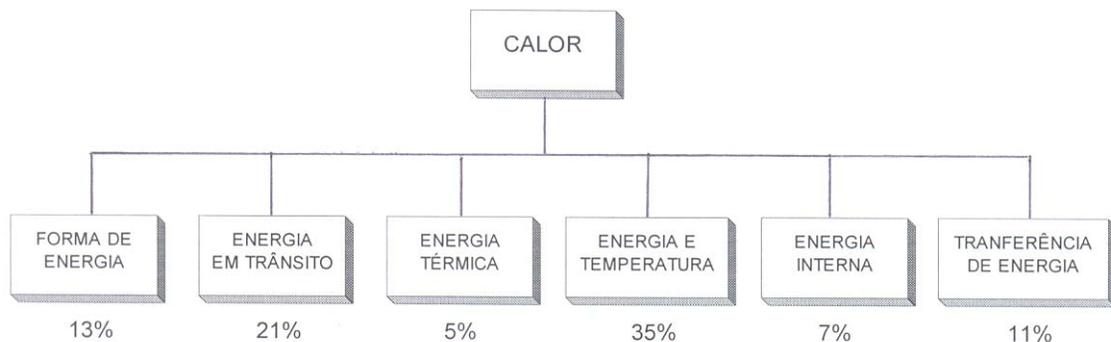


FIGURA 4-4: CONCEPÇÕES DOS ALUNOS SOBRE CALOR

1. FORMA DE ENERGIA

Alguns alunos conceituaram calor simplesmente como uma forma de energia.

- É uma forma de energia.
- Forma na qual a energia pode ser apresentada, ou seja, tipo de energia.
- É uma forma de energia através do qual se pode produzir trabalho.

[123] DRIVER, Rosalind, GUESNE, Edith, TIBERGHIE, Andr e. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. 2^a ed. Madrid : Morata/MEC, 1992. p. 95-102.

Essa concepção é bastante difundida e encontrada em livros didáticos do ensino médio [124] e superior [125]. Como afirmamos anteriormente, a idéia de formas de energia é importante na discussão da conservação da energia, embora exista quem advogue o contrário, preferindo enfatizar a transferência de energia [126].

2. ENERGIA EM TRÂNSITO

Outra concepção de calor presente nos livros didáticos [127] que os alunos aprendem talvez por sua facilidade de memorização é como energia em trânsito.

- É a energia em trânsito.
- Uma forma de energia, fluxo de energia.
- Uma forma de energia que pode ser trocada entre dois corpos.
- É uma forma de energia capaz de ser transferida de um corpo para outro, ou de um meio para outro.

Ao adotar o conceito de calor como forma de energia, esta deve ser transitória, pois não há calor contido nos sistemas. Entretanto, dentro desse mesmo raciocínio, o trabalho representa uma variedade de formas de energia, de modo que as afirmações acima são incompletas, pois não distinguem calor de trabalho.

3. ENERGIA TÉRMICA

A conceituação do calor como energia térmica está presente em algumas respostas dos alunos.

[124] PERUZZO, Tito Miraglia, CANTO, Eduardo Leite. *Química: na abordagem do cotidiano*. São Paulo : Moderna, 1996. p. 315.

[125] RESNICK, Robert. Op. Cit. v.2. p. 184-186.

[126] ELLSE, Mark. Transferring not transforming energy. *School Science Review*, v.69, p. 427-437, 1988.

[127] FONSECA, Martha Reis Marques. *Química*. São Paulo : FTD, 1992. v.2. p. 80.

- Energia térmica.
- Fluxo de energia térmica.
- É uma forma de energia (energia térmica).
- É a energia que está associada à temperatura.

Também é encontrada na bibliografia da disciplina de Física Geral [128]: “Na Fig. 1a, em que $T_S > T_E$, dizemos que a energia térmica, para a qual daremos o símbolo Q , flui do sistema para a vizinhança.”

Nossa primeira objeção baseia-se no fato que a palavra térmico significa temperatura em uma série de expressões de uso corrente em termodinâmica como, equilíbrio térmico, processo isotérmico, dilatação térmica, etc., e calor ou energia interna, em outras, por exemplo, máquina térmica, reservatório térmico, capacidade térmica, condutividade térmica. A energia térmica pode induzir à indiferenciação entre calor e temperatura, bem conhecida na pesquisa em ensino [129]. Essa confusão está presente também nas concepções de calor dos nossos alunos:

- É a elevação da temperatura, aumento de energia.
- É a manifestação de variação de temperatura.
- Sensação de “quente ou frio” manifestado em todo tipo de matéria. O calor flui de um corpo mais quente para um mais frio.
- Pode-se dizer que é a sensação de quente ou frio que pode se ter algum objeto.

A segunda objeção reside na ausência de uma definição precisa para energia

[128] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, MERRILL, John. Fundamentos de física. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos. 1991. v.2. p.181.

[129] HIERREZUELO MORENO Op. Cit, p. 117-133.

térmica por parte dos autores que a empregam. Barrow, por exemplo, apenas sugere que a energia térmica depende da temperatura. Zemansky [130], apresenta uma série de citações de livros-textos em que energia térmica significa simultaneamente calor e energia interna. Mesmo em textos mais avançados, de mecânica estatística [131], o adjetivo térmico é empregado com referência tanto ao calor como à temperatura.

Portanto, a concepção de calor como energia térmica dificulta a aprendizagem do conceito de calor como processo.

4. ENERGIA E TEMPERATURA

Grande número de alunos estabeleceu relações entre calor, energia e temperatura. As relações são de diversos tipos e incluem as idéias citadas nas categorias anteriores.

Um primeiro tipo de associação corresponde ao conceito adotado por vários autores e encontrado na bibliografia das disciplinas de Física Geral [132] e Físico-Química [133].

- É a energia transferida de um corpo a outro devido a diferença de temperatura.
- É a energia em trânsito de um ponto para outro devido a diferença de temperatura entre os pontos.
- É uma forma de energia transferida quando dois corpos de diferentes temperaturas estão em contato.

[130] ZEMANSKY, Mark W. The use and misuse of the word "heat" in physics teaching. *The Physics Teacher*, sept 1970, 295-300.

[131] MORSE, Philip M. *Thermal Physics*. 2nd ed. Reading, MA : Benjamin/Cummings, 1978.

[132] HALLIDAY, Op. Cit. v.2. p.181.

[133] PILLA, Op. Cit. p. 132. CASTELLAN, Op. Cit. p. 107.

Essa concepção presume o calor como forma de energia transitória. Um ponto positivo para o ensino é a presença da causa para o processo de transferência de energia nas definições. Entretanto, muitos expressaram-se de modo pouco claro.

- Calor está relacionado à diferença de temperatura.
- (Forma) Energia em trânsito causada por um Δt .
- Energia em trânsito ocasionada por uma diferença de temperatura.
- É energia de transição que ocorre entre dois corpos quando entre eles existe diferença de temperatura.

Outro tipo de relação considera o sentido da transferência de energia definido pelos valores de temperatura dos corpos em contato térmico.

- É a energia liberada de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura quando em contato.
- Forma de energia que é transmitida de um corpo de maior temperatura, para um corpo de menor temperatura.

O sentido do processo também pode ser definido pelas sensações de quente e frio que os corpos provocam.

- É a energia térmica em trânsito, quantidade de energia que passa de um corpo quente para um corpo frio por exemplo.
- Espécie de energia capaz de transmitir-se de um corpo quente para um corpo frio.

Esses modos de conceituar calor atribuindo sentido à transferência de energia são encontrados em Nussenzveig [134] e Resnick [135], não sendo estranho portanto, que os alunos a manifestem.

As relações entre calor, quente e frio estão bastante enraizadas no senso comum, de modo semelhante à antiga teoria do calórico. O conhecimento da evolução histórica do conceito de calor é fundamental para a mudança dessa concepção.

A associação entre calor, energia e temperatura, embora nem sempre clara serve de âncora para o conceito de calor como processo. A atribuição de sentido não prejudica a aprendizagem, embora não faça parte do conceito de calor no âmbito da primeira lei da termodinâmica. A discussão a esse respeito é realizada durante o ensino da segunda lei.

5. ENERGIA INTERNA

Apenas uns poucos alunos conceituaram explicitamente o calor como energia interna

- Calor é energia de um corpo.
- É a quantidade de energia térmica de um corpo.
- Quantidade de energia que possui determinado sistema.
- Calor é uma forma de energia que existe dentro dos corpos (sistemas).

Essa concepção se choca com as idéias de forma de energia transitória e processo, constituindo-se em obstáculo para a aprendizagem do conceito de calor. Calor como energia interna relaciona-se a calor como calórico. A noção está implicitamente

[134] NUSSENZVEIG, H. Moisés. *Curso de física básica*. São Paulo : Edgard Blücher, 1981. v.2. p. 279.

[135] RESNICK, Op. Cit. v.2. p.181-182.

presente em outras respostas em que se fala de liberação, absorção, transporte, transferência, movimento, fluxo, troca, transmissão de energia, etc.

6. TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

O conceito de calor como processo foi expresso por poucos.

- Trocas de energia entre os corpos.
- Transferência de energia entre dois corpos.
- É um processo de transferência de energia, ou calor.
- É a transferência de energia de um corpo mais quente para um corpo mais frio.

Esta noção é facilitadora da aprendizagem do conceito de calor como processo, embora em quase todas as respostas não seja citada a causa da troca ou transferência. De fato, o exame dos mapas conceituais (discutidos nas próximas seções) mostrou que para muitos alunos não existe relação conceitual entre calor e temperatura. Para alguns a relação é de medida, um conceito da teoria do calórico

- *calor é medido pela temperatura*
- *calor é medido na forma de temperatura*
- *calor mede temperatura*

para outros a relação é vaga

- *calor resulta temperatura*
- *calor depende temperatura*
- *calor associado à variação de temperatura*

e para outros poucos, a relação entre calor e temperatura é a termodinamicamente correta

- *calor provém da diferença de temperatura*
- *calor causado por uma diferença de temperatura*
- *calor existe diferença de temperatura*

Em resumo, encontramos uma grande dispersão de significados acerca dos conceitos da primeira lei da termodinâmica possuídos pelos alunos. Essas informações nos serviram como referência para a produção das Notas sobre termodinâmica (Apêndice 1) e orientaram discussões em sala de aula. Após a exposição dos conceitos de energia, energia interna, calor e trabalho discutimos demorada e reiteradamente, com os alunos, suas respostas ao questionário, procurando mostrar as diferenças em relação aos conceitos aceitos no contexto da termodinâmica.

4.2 MAPAS CONCEITUAIS

4.2.1 MAPAS CONCEITUAIS PRÉVIOS AO ENSINO

No início do curso, em três diferentes semestres, solicitamos aos alunos que confeccionassem um mapa conceitual da termodinâmica contendo os seguintes conceitos: energia, energia interna, calor, trabalho, equilíbrio térmico, temperatura, processo irreversível e entropia. Solicitamos também, que explicassem a hierarquia adotada.

Com isso buscávamos verificar a existência de estruturas conceituais que identificassem as leis da termodinâmica, como na Figura 3-1, e mais especificamente, como se estruturavam os conceitos de energia, energia interna, calor e trabalho na mente dos alunos.

O exame desses mapas conceituais prévios ao ensino revelou que apenas 11% dos alunos organizou os conceitos em três grupos. Como se pode notar pelos conceitos iniciadores dos mapas, listados a seguir, os agrupamentos não correspondem totalmente às leis da termodinâmica, exceto no caso do aluno F5 [*]:

- L4: calor - energia interna - trabalho
- K4: calor - entalpia - entropia
- P4: temperatura - energia - energia interna
- D5: temperatura - energia - calor
- Is8: equilíbrio térmico - entropia - processo irreversível
- F5: temperatura - energia interna - entropia

O estudante F5 identificou explicitamente no mapa cada estrutura conceitual com uma das leis da termodinâmica, nomeando-as, como pode ser visto na Figura A4-1 do Apêndice 4. Embora a hierarquia apresentada tenha sido diferente da que propomos na Figura 3-1, o mapa exibiu coerência.

Outro aluno que fez referência explícita às leis da termodinâmica foi K4: *O mapa foi feito dessa maneira, porque o conceito de calor é o assunto básico da termodinâmica e através dessa forma de energia e das suas transformações surgem os outros conceitos como por exemplo: temperatura, equilíbrio térmico, etc. Outra razão está no fato*

[*] Cada aluno é identificado por uma ou duas letras seguidas por um número.

da entropia ser o tópico básico da 2ª lei da termodinâmica e se relacionar com a entalpia que é o tópico da 1ª lei e com os conceitos restantes. No entanto, no mapa de K4 (ver Figura A4-2), a energia interna é um conceito da segunda lei e a primeira se restringe à entalpia [*].

Os mapas conceituais dos outros alunos, como K4, contiveram estruturas em que conceitos pertencentes a mais de uma das leis se misturaram. Não foram apresentadas quaisquer justificativas para as hierarquias adotadas.

Outro grupo (11%) confeccionou seus mapas tomando dois conceitos como principais: energia - entalpia, energia - entropia, energia - energia térmica, calor - temperatura, calor - trabalho e temperatura - energia interna. As poucas observações feitas pelos alunos não esclareceram porque entenderam esses conceitos como os mais gerais.

Os demais alunos (78%) construíram mapas iniciando-os com apenas um conceito. Entre os conceitos iniciadores predominou a energia, em 56% do total de mapas. As explicações dos alunos acerca da hierarquia foram bastante diversificadas:

- A4: *O conceito de energia foi para mim o mais importante de todos. Seis outros conceitos são apenas formas de energia em diferentes situações (...)*
- En4: *Achei que a energia fosse um conceito mais geral podendo dividir os outros conceitos em torno desse conceito principal.*
- Fr5: *A termodinâmica sempre gira em torno de três grandezas principais através de uma equação: $\Delta U = Q - W$ (energia Interna, Calor e Trabalho). Mas o pilar principal, é, em minha opinião, o calor, por este ser o principal objeto de estudo.*

[*] Na primeira experiência entalpia e energia livre constavam da lista de conceitos para confecção do mapa conceitual e da relação de termos a conceituar. Nas outras duas experiências foram retirados.

- Jo5: *A energia é o conceito chave da termodinâmica. O calor e o trabalho são formas de energia transitórias e constituem a energia interna, ou seja, esta energia pode ser trabalho, calor ou ambas ($\Delta U = Q - W$). (...).*
- E8: *A energia é o conceito mais geral pois irá determinar a temperatura e a energia interna do corpo, a partir desses conceitos secundários determina-se os outros conceitos.*

Essa variedade de razões para a eleição da energia como conceito mais geral é coerente com as respostas dos questionários: grande parte dos alunos não conceituou energia e aqueles que o fizeram, apresentaram conceituações um tanto vagas e obscuras. Vale notar que a interconversão das formas de energia, que lhe atribui um caráter multidisciplinar, unificador e abrangente, foi citada por poucos e de modo muito sucinto; a conservação, como traço possibilitador da quantificação da energia, raras vezes foi citada.

Outros conceitos escolhidos para iniciar os mapas conceituais foram: calor, temperatura, trabalho, processo irreversível, energia livre. Inexistiram comentários a respeito da hierarquia, exceção feita ao aluno Tr5 que iniciou o mapa pelo conceito de calor (Figura A4-3):

- Tr5: *A hierarquia acima sugere a energia como responsável de todos os processos termodinâmicos. Entropia, trabalho, entalpia são termos derivados da quantidade, aplicação e conservação da energia.*

Há uma incoerência entre a explicação que colocou a energia como conceito principal da termodinâmica e o diagrama, em que o calor apareceu no topo e a energia

ao centro. É possível que o aluno não tenha entendido a relação convencional entre posição no mapa e grau de generalidade dos conceitos, ou mesmo haja empregado intuitivamente uma convenção pessoal em que o conceito principal se situe no centro do mapa e os específicos se distribuam radialmente, como já documentado na literatura [136].

Os conceitos da primeira lei da termodinâmica foram relacionados pelos alunos de diversos modos, que reunimos em cinco categorias discutidas à frente. Para facilitar a identificação escrita, criamos representações literais das estruturas conceituais presentes nos mapas utilizando de símbolos dos conceitos — E: energia, U: energia interna, Q: calor e W: trabalho. Os níveis hierárquicos são representados da esquerda para a direita. Conceitos entre colchetes e parênteses encontram-se em um mesmo nível de generalidade (ou especificidade), sendo os colchetes hierarquicamente superiores. A Figura 4-5 mostra dois exemplos de estruturas construídas pelos alunos e suas representações literais.

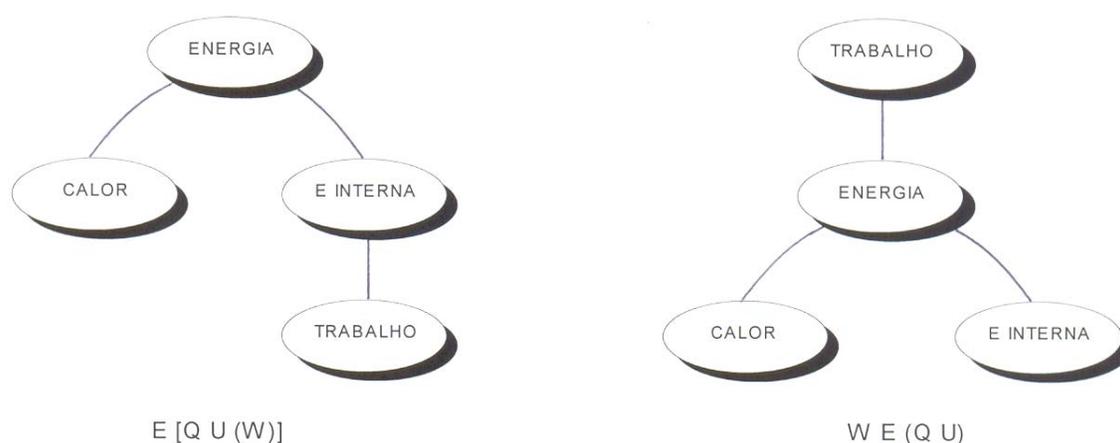


FIGURA 4-5: EXEMPLOS DE ESTRUTURAS CONCEITUAIS

[136] MOREIRA, *Mapas Conceituais*, p. 58-59.

Os mapas foram categorizados considerando-se tipos de estruturas formadas pelos conceitos da primeira lei da termodinâmica. Como já comentamos, essas estruturas não foram localizadas separadamente nos mapas, porém entremeadas com os demais conceitos, situadas em vários níveis de hierarquia. São elas:

1. Estruturas em que energia subordina diretamente energia interna que subordina diretamente calor e trabalho.

A estrutura correspondente a esta categoria é E U (Q W) e é apresentada na Figura 4-6. Em nenhum dos mapas calor e trabalho foram interrelacionados. Pouco mais de um sétimo dos estudantes (14%) estruturou os conceitos da primeira lei da termodinâmica desse modo. A Figura A4-4 mostra o mapa conceitual construído pelo aluno A4, pertencente a esta categoria.

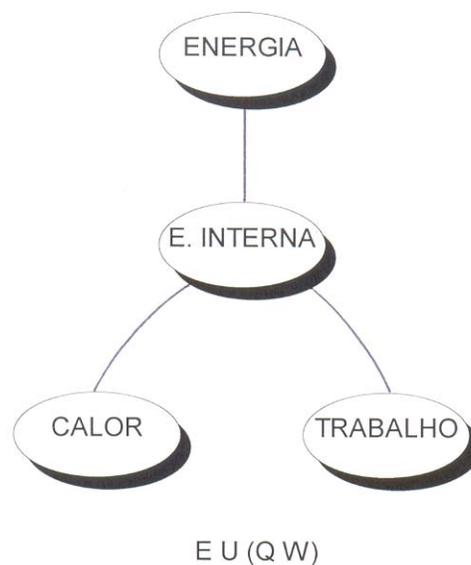


FIGURA 4-6: ESTRUTURA CONCEITUAL DA CATEGORIA 1

Este é o esquema hierárquico presente em nosso mapa conceitual da Figura 3-1. Ao optarmos por esta representação da primeira lei da termodinâmica, definimos a armazenagem da energia (relação energia - energia interna) como mais importante que a

transferência (relação da energia interna com calor e trabalho) e que a conversão de energia (relação entre calor e trabalho). Essa construção determinou uma linha de exposição do assunto (ver Apêndice 1) que julgamos adequada ao ensino facilitador da aprendizagem significativa da termodinâmica.

Apesar da hierarquia ser a mesma, as relações conceituais contidas nos mapas dos alunos mostraram um quadro diferente do que propomos. A energia interna foi entendida como um tipo ou uma possibilidade da energia [*], numa relação bastante vaga, que não apresentou característica alguma da energia interna:

- *Energia **tipo** energia interna*
- *Energia **pode ser** energia interna*
- *Energia **tem** energia interna*

As relações conceituais energia interna - calor e energia interna - trabalho foram rotuladas igualmente em cada um dos mapas ou seja, calor e trabalho foram relacionados do mesmo modo com a energia interna. Em nenhum dos mapas houve menção à transferência de energia e, em algumas respostas, o caráter matemático da relação foi dominante

- *Energia interna **envolve** calor / trabalho*
- **Energia interna varia com calor / trabalho** ($\Delta U = Q + W$)
- *Energia interna **depende do** calor / trabalho*
- **$\Delta U = Q \pm W$**

[*] Nas citações, escreveremos os termos dos conceitos relacionados em tipo normal e os conectivos empregados pelos alunos em negrito.

Enfim, apesar dos alunos terem apresentado estruturas com a mesma hierarquia daquela que propomos, seus conteúdos foram bem diferentes.

2. Estruturas em que energia subordina diretamente calor, energia interna e trabalho.

Cerca de um quinto dos alunos (22%) relacionou os conceitos segundo as estruturas E (Q U W) e E (Q W) U mostradas na Figura 4-7 e exemplificadas nas Figuras A4-5 e A4-6 do Apêndice 4. Não identificamos razões para que a energia interna fosse representada em um nível hierárquico menor que o calor e o trabalho, nos casos em isso aconteceu. Algumas variações incluem relações conceituais entre calor, energia interna e trabalho.

A categoria 1 não é a única estrutura representativa da primeira lei da termodinâmica. Embora o número de possibilidades seja limitado pelo fato da energia ser o conceito primitivo desta lei, as estruturas da categoria 2 são igualmente possíveis, de acordo com o raciocínio de quem as propõe.

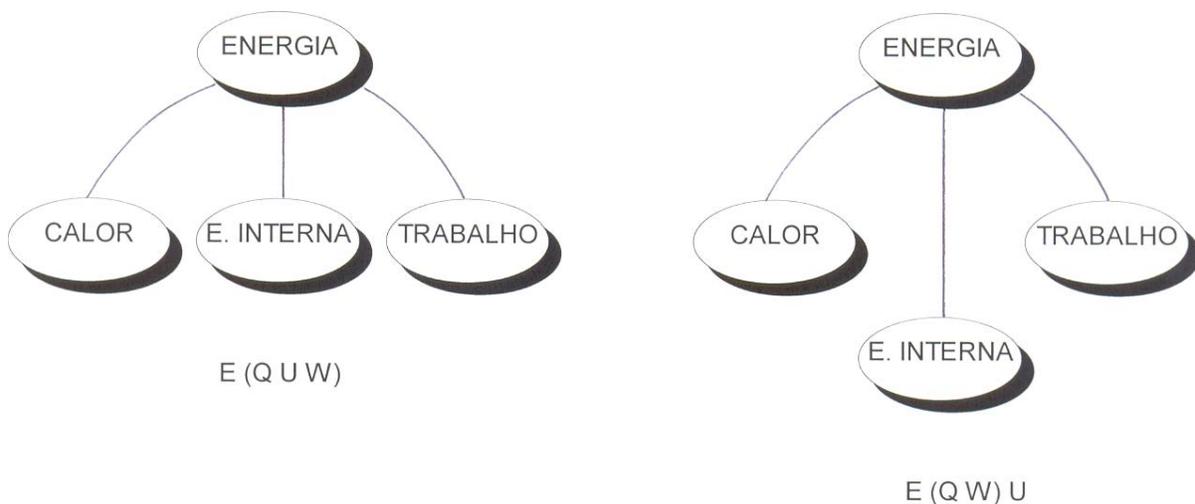


FIGURA 4-7: ESTRUTURAS CONCEITUAIS DA CATEGORIA 2.

No nosso caso, a estrutura E (Q U W) foi a base do ensino da conservação da energia, pois o processo de conversão e as formas de energia assumiram o primeiro lugar em importância na discussão, conforme se vê na Figura 3-2. A estrutura da categoria 1, E U (Q W), iria surgir como modificação de E (Q U W), depois de construída a conservação da energia e introduzidas as idéias de armazenagem e transferência da energia.

Nos mapas confeccionados pelos alunos que pertencem a esta categoria, a multiforiedade foi a característica dominante da energia. Isso fica evidente pelas relações conceituais estabelecidas entre energia e calor,

- *Energia **pode ser** calor*
- *Energia **formada por** calor*
- *Energia **é manifestada** calor*
- **Energia** pode se transportar sob a forma de **calor**

entre energia e trabalho,

- *Trabalho **é forma de** energia*
- *Energia **pode transformar-se** trabalho*
- **Energia** pode ser transformada em **trabalho**
- *Energia **observada na forma** trabalho*

e entre energia e energia interna

- *Energia **tipo** energia interna*
- *Energia **uma de suas formas** é energia interna*
- *Energia **pode existir sob a forma de** energia interna*

- *Energia pode estar apresentada energia interna*

De um modo geral os alunos identificaram calor, trabalho e energia interna como formas de energia sem contudo, caracterizá-las. Nas observações feitas para explicar seus mapas alguns atribuíram causas para a ocorrência de calor e outros poucos conceituaram energia interna como energia armazenada ou própria do sistema.

Parte das relações entre calor, trabalho e energia interna traçadas nos mapas não foram explicitadas e as demais revelaram a ausência de clareza dos alunos a respeito dos conceitos:

- *Calor e trabalho se relacionam através da energia (Q - E - W)*
- *Energia interna é dada por calor*
- *Calor parte energia interna*
- *Energia interna parte trabalho*
- *Energia interna não interfere trabalho*

3. Estruturas com quatro conceitos da primeira lei da termodinâmica relacionados em hierarquias diversas.

Várias são as estruturas pertencentes a esta categoria, correspondendo a 18% do total. Algumas variações estruturais estão mostradas na Figura 4-8. Os esquemas encontrados foram os seguintes:

E [Q W] (U)

E [Q U (W)]

[Q W] (E U)

E Q W U

Q E (U W)

Q W E U

E Q (W U)

W [E (U)Q]

W E (Q U).

Dois exemplos são apresentados nas Figuras A4-7 (esquema [Q W] (E U)) e A4-8 (esquema EQWU) do Apêndice 4.

Em algumas das estruturas, a energia surgiu como o conceito hierarquicamente mais alto, o que está de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Entretanto, os níveis subsequentes contiveram impropriedades. Por exemplo, na estrutura E [Q W] (U), o aluno subordinou calor e trabalho à energia através de **transformação** e estes subordinaram a energia interna por uma relação matemática (**diferença matemática**). A energia interna foi colocada num nível mais baixo do mapa, possivelmente porque tem apenas conceituação matemática. Embora o mapa do aluno estivesse certo no âmbito dos seus conhecimentos, está errado no contexto da termodinâmica. Outras incorreções foram encontradas nos demais casos.

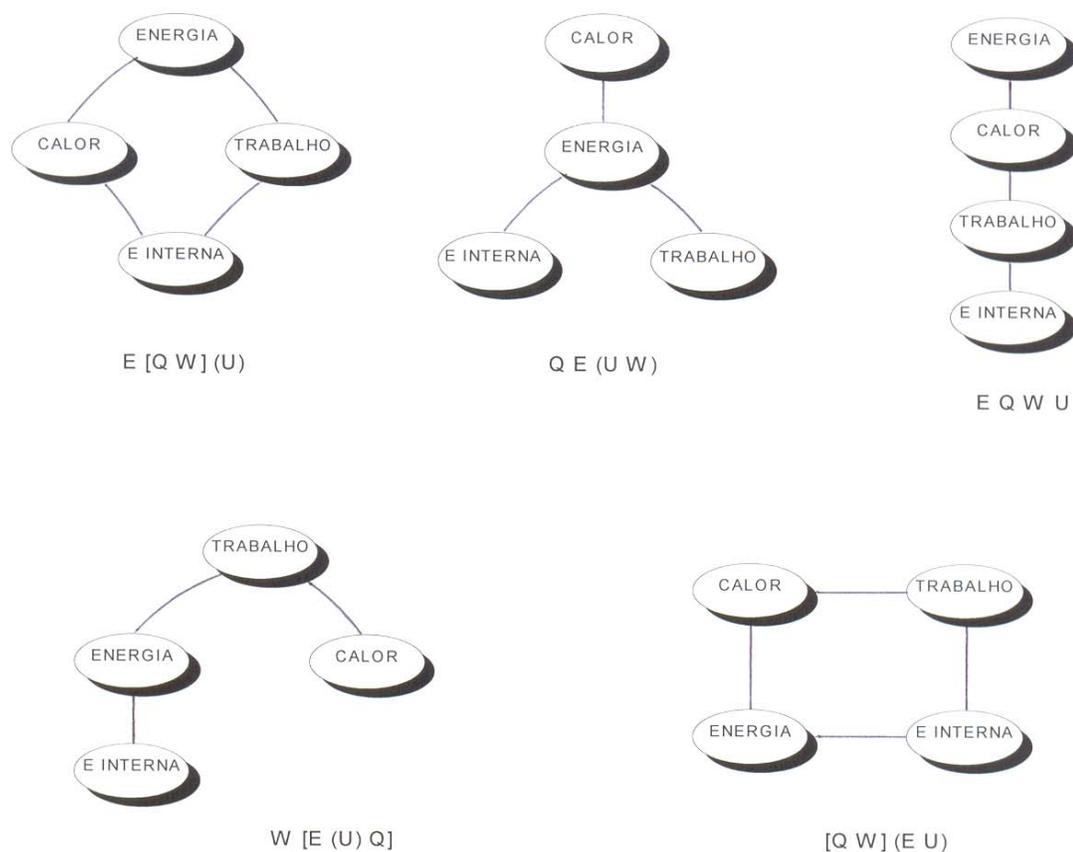


FIGURA 4-8: ALGUMAS ESTRUTURAS CONCEITUAIS DA CATEGORIA 3

Nas outras estruturas o lugar do conceito mais geral foi ocupado pelo calor ou pelo trabalho ou por ambos. As poucas explicações não esclareceram o porquê da hierarquia. Os mapas pertencentes a esta categoria revelaram a existência de algum conhecimento da primeira lei da termodinâmica, porém, mostraram também a falta de clareza, a opacidade conceitual dos alunos em relação a essa lei.

A relação energia - calor foi expressa por termos como: **origina, transformação, que é, pode se apresentar na forma de, trânsito**. Nas relações entre energia e trabalho os alunos empregaram os conectivos: **transformação, quando produz movimento é, é a variação**. A energia interna foi relacionada com a energia como possibilidade (**pode ser, pode ser apresentada**). Algumas poucas relações entre calor, trabalho e energia interna foram estabelecidas matematicamente e através da idéia de transformação. Boa parte das relações conceituais representadas nos diagramas não continha quaisquer palavras a explicitá-las.

4. Estruturas com três conceitos da primeira lei da termodinâmica relacionados em hierarquias diversas.

Esta categoria é a mais numerosa das cinco: quase um terço (29%) dos alunos conseguiu agrupar, relacionando diretamente, apenas três dos quatro conceitos da primeira lei da termodinâmica. Em mais da metade dos mapas o grupo de conceitos foi constituído por energia, calor e trabalho, alguns com a energia em posição hierarquicamente superior. As estruturas encontradas foram:

E (Q W)

Q E W

E W Q

Q (W E)

A Figura A4-9 mostra o mapa conceitual do aluno Ar8, em que energia, calor e trabalho encontram-se interligados, sem, contudo, ligar-se diretamente à energia interna.

As relações entre energia e calor não diferiram das encontradas nas categorias anteriores

- *Energia em trânsito calor*
- *Energia é dada sob a forma de calor*
- *Energia pode ser calor*
- *Calor é energia*
- *Calor é transferência de energia*

Nas relações entre energia e trabalho, além da idéia de forma de energia

- *Energia pode ser trabalho*
- *Energia se transforma trabalho*
- *Energia é dada sob a forma de trabalho*

compareceu a conceituação de energia como capacidade de realizar trabalho

- *Energia capacidade realizar trabalho*
- *Energia realiza trabalho*
- *Energia utilizada em trabalho*

Uns poucos relacionaram calor e trabalho através da idéia de conversão

- *Calor realiza trabalho*
- *Trabalho gera calor*
- *Calor pode virar trabalho*

Os demais mapas constituíram combinações variadas de três dos quatro conceitos da primeira lei da termodinâmica que são:

E (Q U)

E (W U)

E U Q

E U W

U (Q W)

(Q E) U

As poucas relações conceituais explicitadas nesses casos foram do mesmo teor que as já anteriormente citadas.

5. Inexistência de estrutura conceitual da primeira lei da termodinâmica.

Nesta categoria agrupamos os mapas conceituais em que apenas dois dos quatro conceitos da primeira lei da termodinâmica foram diretamente relacionados e aqueles em que nenhuma relação direta foi estabelecida entre os mesmos. Correspondem a 17% dos mapas confeccionados. Um exemplo dos mapas dessa categoria é mostrado na Figura A4-10.

A variedade de estruturas encontradas nos mapas conceituais dos alunos demonstra a heterogeneidade de pensamento acerca da importância do conceito de energia em termodinâmica. Notamos também que um número reduzido de alunos estabeleceu conexões entre os conceitos de calor, trabalho e energia interna e que estas foram ou de natureza matemática ou imprecisas, com raras exceções. Este quadro mostra que no início do curso os alunos possuíam estruturas teóricas da primeira lei da termo-

dinâmica inadequadas. Por isso, o ensino deveria enfatizar a demonstração da amplitude e da inclusividade do conceito de energia, o que lhe conferiria o caráter unificador de diversas áreas do conhecimento, redundando na primeira lei da termodinâmica. Desse modo pretendemos facilitar a reconstrução das estruturas conceituais dos alunos.

As relações conceituais limitadas revelaram a precariedade de conteúdo do conhecimento termodinâmico prévio dos alunos. Características da energia como: contenção, transferência e conversão compareceram muito pouco, tanto nas relações conceituais, quanto nos comentários feitos junto aos mapas. A conservação da energia sequer foi citada. Esses resultados são coerentes com os conceitos de energia, energia interna, calor e trabalho expressos nas respostas do questionário. Ali também, poucos alunos mostraram conhecer apenas uma ou outra propriedade da energia.

As estruturas da primeira lei nos informaram, de modo compacto, sobre como os alunos viam a organização dos conceitos termodinâmicos, qual a importância que lhes atribuíam dentro da teoria. Entretanto, as relações conceituais informaram menos que as conceituações fornecidas por extenso. Nas relações energia interna-energia, calor-energia e trabalho-energia predominou o conceito de forma de energia, com as variações minoritárias já mostradas. A dispersão de significados encontrada nas respostas do questionário não teve correspondência nos mapas conceituais. A limitação imposta pela lista dos conceitos que deveriam compor o mapa e o emprego de conectivos curtos foram as possíveis causas da concentração de significados. Assim, as duas formas de investigação do conhecimento prévio foram usadas de modo complementar.

4.2.2 MAPAS CONCEITUAIS POSTERIORES AO ENSINO

Na segunda metade do curso pedimos aos alunos que confeccionassem outro mapa conceitual da termodinâmica, a partir da mesma lista de conceitos do mapa anterior: energia, energia interna, calor, trabalho, equilíbrio térmico, temperatura, processo irreversível e entropia. Então, já havíamos discutido em aula as três leis da termodinâmica, sua formalização e aplicações da teoria a vários fenômenos.

O primeiro aspecto notado nos mapas conceituais posteriores ao ensino foi o predomínio da energia como conceito mais importante da termodinâmica: em 87% dos mapas a energia compôs o nível mais alto da hierarquia. Em 79% do total dos mapas a energia apareceu como o único conceito mais geral. Nos comentários complementares, vários alunos apenas afirmaram o fato, sem justificar:

- A14: *O conceito mais geral é o de energia. A partir dele definimos calor, trabalho, e energia interna que são tipos específicos de energia. (...)*
- Is4: *(...) Partindo do conceito mais amplo que é o da energia seguindo das definições de como ela se manifesta, como é transferida e como se apresenta em outras formas, para os pontos mais importantes como o calor, o trabalho e a energia interna (...).*
- K4: *De acordo com o mapa conceitual, o conceito mais geral da termodinâmica, é o conceito de energia, a partir daí surgem as formas de energia transitória (calor e trabalho) e a forma de energia própria da matéria devido a sua existência física (energia interna). (...)*

- Mo4: *Partindo do conceito mais geral, energia, para os conceitos que dele dependem ou equivalem. Isso foi possível através do conceito de cada termo.*

Outros apresentaram justificativas nem sempre adequadas, inclusive, pela má expressão dos alunos. Ninguém comentou sobre a conservação da energia. Contenção, transferência e conversão da energia foram citadas em um ou outro comentário.

- Io4: *A energia e os processos de transferência é o motivo de todo o estudo termodinâmico. Ligada a ela está a energia interna que é transferida em forma de trabalho (qualquer que seja a causa do processo exceto ΔT) e a variação de temperatura causa a transf. de E.I. na forma de calor. Calor e trabalho são formas interconvertíveis de energia. (...)*
- W4: *Energia no topo para grande importância na termodinâmica é variações de energia. Calor e trabalho são formas de variação de energia, na qual a dependência do calor é só com a diferença de temperatura, qualquer outra diferença de propriedade intensiva é trabalho. Energia contida no sistema, pela sua existência material é energia interna (...)*
- Rm8: *A termodinâmica está relacionada diretamente com o estudo da transferência de energia. A energia interna equaciona termos como calor e trabalho $U = Q - W \rightarrow$ considerando-se o sistema fechado.*

Apenas 4% dos alunos produziram mapas com três estruturas correspondentes às leis da termodinâmica sem, porém, chamar a atenção para tal correspondência. Os demais iniciaram seus mapas com apenas um conceito diferente de energia (entalpia, temperatura, processo irreversível, sistema), ou usaram de dois conceitos (energia - processo irreversível, sistema - vizinhança, entropia - processo irreversível).

Estes resultados demonstram a maximização da importância do conceito de energia na aprendizagem da termodinâmica em detrimento dos dois outros conceitos primitivos, equilíbrio térmico e processo irreversível.

É possível que o ensino tenha contribuído para tal acontecimento. Reconhecemos a energia como o conceito central em termodinâmica, embora equilíbrio térmico e processo irreversível sejam também conceitos primitivos e por isso, ocupem lugar no mesmo nível de generalidade da estrutura teórica. Em nossas Notas sobre Termodinâmica Básica (ver Apêndice 1), afirmamos que “o objeto de estudo da termodinâmica é a conversão da energia em suas diversas formas. O estudo termodinâmico abrange a predição da possibilidade de ocorrência dos processos de conversão da energia, dos estados de equilíbrio desses processos e das quantidades das diferentes formas de energia envolvidas. Em termodinâmica, a energia é o conceito central.” O fato dessas afirmações se encontrarem em material especialmente preparado pelo professor da disciplina para os alunos, deve tê-los influenciado fortemente ao perceber que são significados que o professor pretendeu que fossem captados. Compreender a energia como conceito central da termodinâmica faria parte da congruência de significados entre professor e alunos.

Outro aspecto a considerar é que o ensino da primeira lei da termodinâmica foi mais demorado e detalhado que as discussões das segunda e zero-ésima leis. O ensino dos atributos da energia e sua articulação num todo coerente requereu bastante

tempo de exposição e discussão, tanto em aulas teóricas como em aulas de resolução de problemas. Esse tempo foi necessário porque a energia possui uma grande amplitude conceitual e faz parte do senso comum dos alunos. A diferenciação do conceito de energia adequada à termodinâmica requer um processo de reconciliação integradora que cremos, seja muito trabalhoso, tanto que os alunos nem sempre atingiram os resultados que esperávamos, como se vê nas seguintes justificativas:

- Sr5: *Energia essência primária do universo, tudo é composto de energia. A energia se apresenta sobre variadas formas calor (energia térmica), trabalho (energia mecânica), energia elétrica, etc. (...)*

- Rd8: *A energia foi escolhida como conceito mais geral devido ao fato de tudo que existe na natureza poder ser convertido em energia através de algum processo [e] essa energia pode ser classificada como calor caso haja transferência desta entre dois sistemas ou trabalho de qualquer espécie caso isso não ocorra.*

Nestes comentários está presente uma visão de mundo onde a energia se destaca como um conceito muito mais abrangente que em termodinâmica. Como os alunos não conceituaram a energia desse modo no teste prévio ao ensino, a discussão em aula deve haver propiciado o desenvolvimento dessas idéias durante a reconciliação integradora.

No caso da segunda lei da termodinâmica, o conhecimento de processo irreversível possuído pelos alunos era extremamente precário, como processo que não pode ser revertido. Como o novo conceito requeria pouca mudança conceitual, o questiona -

mento dos alunos nas aulas foi menor, sua atitude aparentou ser mais receptiva que no caso dos conceitos da primeira lei que encontraram resistência à assimilação. De fato, a alteração no conhecimento dos alunos que o processo irreversível pode causar está mais próxima da tomada de consciência acerca de determinados aspectos da realidade — aprendizagem correlativa do conceito de processo — que de uma mudança conceitual que exija aprendizagem combinatória, como ocorre com a energia.

Já o conceito de equilíbrio térmico como igualdade de temperaturas estava bem estabelecido na estrutura cognitiva dos alunos. Então, a discussão ficou centrada no papel que representa na estrutura teórica da termodinâmica, como um dos seus conceitos primitivos.

Creemos que a ênfase no ensino da energia como conceito central da termodinâmica e as mudanças conceituais que a aprendizagem significativa da energia acarreta, alterando a visão de mundo dos alunos, foram os principais fatores responsáveis pelo seu posicionamento superordenador na estrutura cognitiva dos alunos após o ensino.

Os mapas conceituais posteriores ao ensino foram agrupados nas mesmas cinco categorias que os mapas confeccionados previamente, considerando-se os tipos de estruturas formadas pelos conceitos da primeira lei da termodinâmica. Essas estruturas foram localizadas em vários níveis de hierarquia. Um fato notável é que as categorias 1 e 2, cujas estruturas possuem hierarquia adequada segundo nosso ponto de vista, incluíram 76% dos mapas posteriores ao ensino, pouco mais do dobro dos mapas produzidos na situação inicial (36%).

1. Estruturas em que energia subordina diretamente energia interna que subordina diretamente calor e trabalho.

A estrutura desta categoria é E U (Q W), mostrada na Figura 4-2. Em alguns poucos mapas, calor e trabalho foram interrelacionados. Aparentemente, houve um aumento do número de alunos que estruturou os conceitos da primeira lei da termodinâmica desse modo (21%) em relação ao início do curso (14%). Os mapas dos alunos CA4 e Rm8, mostrados nas Figuras A4-11 e A4-12, são bons exemplares desta categoria.

Embora parte dos estudantes não tenha explicitado as relações conceituais representadas nos diagramas, aquelas que foram expressas mostram um quadro bem diferente do anterior. A energia interna não era mais aquela forma de energia sem atributos, porém, apresentou-se com características determinadas

- *Energia intrínseca à matéria energia interna*
- *Energia inerente à matéria energia interna*
- *Energia forma permanente energia interna*
- *Energia contida no sistema na forma de energia interna*

O conhecimento expresso nestas relações conceituais é congruente com a discussão contida em nossas Notas (ver Apêndice 1). Ali consideramos “a energia interna como a energia possuída por um sistema em virtude de sua existência material. (...) A energia interna é a forma como a energia encontra-se armazenada nos sistemas, portanto, a forma permanente de energia. (...)”

Calor e trabalho foram relacionados do mesmo modo à energia interna, pois os alunos empregaram os mesmos conectivos para rotular as relações conceituais

energia-calor e energia-trabalho. Para alguns, as relações matemáticas foram dominantes

- *Energia interna* **variação de energia interna = $q + w$ calor / trabalho**
- *Energia interna* **depende de calor / trabalho**
- *Energia interna* **equaciona $U = Q - W$ calor / trabalho**

A manutenção das relações apenas quantitativas entre energia interna, calor e trabalho, revela a dificuldade de interpretação fenomenológica da equação da primeira lei da termodinâmica, $\Delta U = Q - W$.

Por outro lado, um número maior de alunos apresentou mudanças conceituais, passando a associar um caráter de transferência ou de transitoriedade ao calor e ao trabalho, entendidos como formas de energia

- *Energia interna* **pode ser transferida sob a forma de calor / trabalho**
- *Energia interna* **forma transitória calor / trabalho**
- *Energia interna* **transfere-se sob a forma de calor / trabalho**

O conceito de formas de energia que os alunos trazem, possivelmente, desde o ensino médio é resistente à mudança. A dificuldade em lidar com calor e trabalho como processos foi patente nas discussões de sala de aula. Portanto, ao assimilar a transferência de energia, os alunos não realizaram a necessária diferenciação progressiva dos conceitos de calor e trabalho, incorporando os processos ao lado das formas de energia mas, fundiram-nos, criando a idéia de formas de transferir energia. Considere-se como reforço, que justificamos a conservação da energia pela interconversão de formas de energia qualitativamente diferentes.

Parece-nos claro que os alunos não conseguiram captar completamente os conceitos de calor e trabalho como processos. De todo modo, é possível descrever os fenômenos que a termodinâmica estuda tanto utilizando as idéias de processos quanto de formas de transferir energia, embora o emprego destas exija uma maior complexidade descritiva.

As relações entre calor e trabalho, quando explicitadas, foram centradas em sua interconvertibilidade, de acordo com as discussões realizadas em aula.

2. Estruturas em que energia subordina diretamente calor, energia interna e trabalho.

O número de mapas conceituais incluídos nesta categoria corresponde a 55% do total, bem maior que os 22% dos mapas prévios ao ensino. Todos mostraram calor, energia interna e trabalho no mesmo nível hierárquico (E (Q U W)) diferentemente dos mapas prévios, em que alguns alunos colocaram a energia interna em um nível inferior a calor e trabalho. Nas Figuras A4-13 e A4-14 são apresentados, respectivamente, os mapas conceituais dos alunos AM4 e AI5, pertencentes a esta categoria.

As relações conceituais mostraram mudanças similares àquelas verificadas nos mapas da categoria 1: a caracterização da energia interna como energia do sistema,

- *Energia **contida no sistema** energia interna*
- *Energia **permanente** energia interna*
- *Energia **armazenada na forma** energia interna*
- *Energia **que o sistema possui** energia interna*
- *Energia **forma que existe em toda matéria** energia interna*

e a conceituação do calor e do trabalho como formas de energia transitórias ou formas de transferir energia:

- *Energia em trânsito calor / trabalho*
- *Energia forma transitória calor / trabalho*
- *Energia variando entre sistemas calor / trabalho*
- *Energia transfere-se como calor / trabalho*
- *Energia pode ser transferido como calor / trabalho*

Embora a maior parte dos alunos haja manifestado as mudanças apontadas, uma porção significativa (30 a 35%) considerou calor, energia interna e trabalho como formas de energia apenas, sem atribuir-lhes características diferenciadoras, de modo semelhante ao ocorrido nos mapas prévios ao ensino.

Verificamos que entre os alunos que construíram essa mesma estrutura da primeira lei, antes e após o ensino, parte mudou as relações conceituais e parte as manteve, revelando resistência. Um dos alunos comentou: *No início do mapa calor, energia interna e trabalho não são diferenciados entre si. Minha intenção é reforçar o caráter de interconvertibilidade da energia mostrando a equivalência entre as formas citadas.* Não cremos que se possa generalizar tal propósito.

A maioria dos alunos porém, havia confeccionado os mapas iniciais com outras estruturas ou sem estruturação da primeira lei da termodinâmica. Sua inclusão nesta categoria se deu em função das mudanças de estrutura conceitual e de relações conceituais. Nesse sentido, a assimilação da idéia de formas de energia, ainda que sem diferenciação, representa um ganho. Houve uma mudança substantiva na estrutura cog-

nitiva dos alunos ao construir essa nova estrutura e em estabelecer relações antes inexistentes.

Poucos alunos representaram relações conceituais entre calor, energia interna e trabalho e um número menor as explicitou como relações matemáticas.

3. Estruturas com quatro conceitos da primeira lei da termodinâmica relacionados em hierarquias diversas.

O aumento percentual dos mapas contidos nas categorias anteriores se deu às custas da diminuição das outras três. Nesta categoria a variação ocorrida foi de 18%, no teste de conhecimento prévio, para 11%, após o ensino.

O exame dos mapas iniciais desses alunos mostrou as seguintes situações: inexistência de estrutura da primeira lei, apenas três conceitos interligados ou estruturas com quatro conceitos. Com a formação e ampliação de estrutura ou a reestruturação dos conceitos, ocorreram mudanças significativas nos conhecimentos dos alunos. Um deles não alterou a hierarquia do mapa. No quadro abaixo comparamos as estruturas anteriores e posteriores ao ensino desses estudantes.

As relações conceituais apresentaram mudanças também. Novas ligações foram estabelecidas e relações existentes foram alteradas. O aluno que manteve a estrutura do mapa, por exemplo, evoluiu da identidade entre calor e energia (*energia **que é o calor***) para a diferenciação da energia tomando o calor como forma transitória (*energia **pode transitar sob a forma calor***). Algumas relações conservaram seu significado.

<i>Mapas Prévios</i>	<i>Mapas Posteriores</i>
<i>Estrutura inexistente</i>	<i>E (Q W) U</i>
<i>Q (W E)</i>	<i>U (Q W) E</i>
<i>U (Q W)</i>	<i>[E U] (Q W)</i>
<i>E Q (W U)</i>	<i>E (Q W) U</i>
<i>E Q (W U)</i>	<i>E Q (W U)</i>

4. Estruturas com três conceitos da primeira lei da termodinâmica relacionados em hierarquias diversas.

A maior redução quantitativa se deu nesta categoria. Embora tenha sido a mais numerosa no conhecimento prévio, com 29% dos mapas, ocupou a penúltima posição no conhecimento posterior ao ensino, com somente 9%. Esse percentual é apenas maior que o da categoria de mapas em que a primeira lei não foi estruturada.

As mudanças de hierarquia mostraram que em alguns casos houve aproximação das estruturas das categorias 1 e 2 e em outros, afastamento. Porém, as relações conceituais não se modificaram a ponto de tornar-se mais claras, sugerindo que pouco mudou na estrutura cognitiva desses alunos.

5. Inexistência de estrutura conceitual da primeira lei da termodinâmica.

Apenas 4% dos alunos tiveram seus trabalhos incluídos nesta categoria. Foram casos em que houve a inclusão de outros conceitos além dos oito exigidos, fazendo com que os quatro conceitos da primeira lei ficassem conectados de modo indireto.

A redução de 17 para 4% apenas de mapas com ausência de estrutura da primeira lei da termodinâmica, é um dado significativo pois mostra que os alunos conseguiram estabelecer relações conceituais novas entre os conceitos de energia, energia interna, calor e trabalho, com ganho real de estruturação do seu conhecimento.

Os mapas conceituais posteriores ao ensino revelaram a congruência de significados alcançada entre o professor e muitos dos alunos, expressas nas estruturas conceituais das categorias 1 e 2. Revelaram também mudanças nas relações conceituais energia-energia interna, energia-calor e energia-trabalho, com um número maior de alunos adotando a idéia de formas de energia, porém, diferentemente do início do curso, de modo diferenciado: a energia interna foi conceituada como forma de energia armazenada (contida, possuída, permanente, etc.) e calor e trabalho foram identificados como formas de energia transitórias ou formas de transferir energia.

Apesar dos alunos não terem demonstrado conhecimento acerca da conservação da energia, as relações entre energia e suas formas indicam o reconhecimento das propriedades de armazenamento, transporte, multiformidade e, em menor escala, de conversão da energia.

As mudanças de estrutura cognitiva que observamos comparando os mapas conceituais confeccionados antes e depois do ensino da primeira lei da termodinâmica não podem ser fruto de aprendizagem mecânica, pois não houve disponibilidade de mapas conceituais para estudo. As estruturas conceituais tiveram que ser criadas pelos alunos com base em seus próprios conhecimentos.

Parece-nos evidente que a aprendizagem significativa manifestada pelos alunos nos mapas conceituais posteriores foi facilitada por nossa proposta de ensino.

4.3 RESOLUÇÕES DE PROBLEMAS

4.3.1 *RESOLUÇÕES DE PROBLEMAS PRÉVIAS AO ENSINO*

O estudo das resoluções de problemas visou identificar o raciocínio dos alunos ao aplicar a primeira lei da termodinâmica. Um raciocínio explicita relações conceituais estabelecidas na estrutura cognitiva. No caso de problemas termodinâmicos com cálculos, o raciocínio deveria incluir a descrição do fenômeno e sua formulação matemática, além da parte numérica propriamente dita (ver capítulo 3, avaliação de aprendizagem).

Nossa pretensão foi comparar as respostas dadas pelos alunos no início do curso com outras obtidas ao longo do mesmo, para verificar as mudanças ocorridas nos modos de resolver os problemas. Com isso em mente, selecionamos problemas dos livros-textos das disciplinas de Física Geral e Química Geral para compor o teste de conhecimento prévio ao ensino. Dois dos problemas escolhidos, um que envolvia uma mudança de estado de agregação e outro, que tratava de uma reação química (ver Apêndice 3), mostraram-se impróprios para o nosso estudo, pois todas as respostas fornecidas pelos alunos continham erros. Além disso, grande parte dos alunos não soube ou lembrou como resolvê-los. Os outros dois problemas eram conhecidos dos alunos e suas resoluções serão discutidas adiante.

A totalidade das respostas obtidas mostra que os alunos não sabiam explicar o raciocínio condutor da resolução dos problemas que lhes foram apresentados. Mesmo quando chegaram ao resultado final, apresentaram apenas as equações e os cálculos.

Eventualmente adicionaram uma ou outra frase explicativa, alguma pretensa justificativa. O entendimento das razões que os levaram a optar por aqueles procedimentos ficava a cargo do leitor.

Em discussões informais a respeito dessas dificuldades, os estudantes explicaram que os professores não costumavam solicitar explicações no nível de profundidade que queríamos. Verificamos que isso realmente ocorria não só em outras disciplinas, como também em Físico-Química I. Antes da formulação da proposta de ensino que discutimos nesta dissertação, nós próprios adotamos essa postura nas avaliações que fizemos. Aceitamos as seqüências de equações e contas como expressão do conhecimento adquirido pelos alunos. Porém, a hipótese de que esse tipo de resolução dos problemas poderiam ser fruto de aprendizagem mecânica, levou-nos a requerer a explicitação do raciocínio nas respostas dos problemas, como forma de evidenciar a aprendizagem significativa dos alunos.

As respostas fornecidas aos problemas do teste de conhecimento prévio ao ensino são discutidas a seguir.

PROBLEMA: TROCA DE CALOR

Cem gramas de água a 75°C e 1atm são misturadas com 50 gramas de água a 30°C e 1atm. Considerando que o sistema não troca energia com a vizinhança, qual o seu estado final?

As respostas típicas se iniciaram com uma das duas sentenças matemáticas:

$$Q_1 + Q_2 = 0 \quad \text{ou} \quad Q_1 = Q_2$$

Em seguida, Q foi substituído por $mc\Delta T$, cada ΔT foi explicitado em termos da temperatura de equilíbrio e das temperaturas iniciais e os cálculos foram realizados. Por exemplo:

$Q_1 + Q_2 = 0$ $m_1 c_1 \Delta t_1 + m_2 c_2 \Delta t_2 = 0$ $100.1(t - 75) + 50.1(t - 30) = 0$ $150 t = 9000$ $t = 60^\circ\text{C}$	$Q_1 = Q_2$ $m_1 c_1 \Delta t_1 = - m_2 c_2 \Delta t_2$ $100.1(T - 75) = - 50.1(T - 30)$ $150 T = 9000$ $T = 60^\circ\text{C}$
--	--

Quase todas as respostas seguiram estes padrões. Não houve texto para explicar e/ou justificar as expressões matemáticas empregadas, apesar do pedido feito aos alunos para que apresentassem as “respostas mais completas possíveis”. Quase não houve referência ao fenômeno, apenas algumas observações aqui e ali, em meio às sentenças matemáticas. Por exemplo:

- *O estado final é líquida.*
- *Pressão constante.*
- *Provavelmente o equilíbrio entre as duas temperaturas.*
- *Tanto a massa de 100g de água quanto a de 50g de água terão no final uma temperatura de $t = 60^\circ\text{C}$.*

Poucos alunos não completaram a resolução do problema ou cometeram algum erro. Cerca de 8% não apresentou resposta ou declarou não saber como fazer.

Esse tipo de resolução contém problemas de natureza conceitual. Em primeiro lugar, supõe a existência de duas quantidades de calor, Q_1 e Q_2 , quando ocorre apenas um único processo de transferência de energia, Q .

Em segundo lugar, associar o calor a qualquer sistema — como calor recebido ou cedido, por exemplo — vai contra a idéia de calor como processo. Também se opõe a uma idéia bastante disseminada entre os alunos, calor como forma de transferir ener-

gia, pois essa forma de energia teria existência transitória, vinculada ao processo e não aos sistemas. Portanto, a expressão com que os alunos iniciaram a resolução do problema ($Q_1 + Q_2 = 0$) é incorreta, pois como lei de conservação só poderia ser aplicada a uma propriedade.

Outro ponto a considerar é que as equações do tipo $Q = m.c.\Delta T$ são remanescentes da teoria do calórico e por isso, incorretas no contexto termodinâmico, onde as equações são $\Delta U = m.c_V.\Delta T$ e $\Delta H = m.c_P.\Delta T$. É verdade que seu emprego conduz ao resultado numérico correto mas, comete-se um erro conceitual ao tomá-la sem relação com a energia interna ou a entalpia.

O procedimento termodinamicamente correto para resolver esse problema passa pelas seguintes etapas:

(a) identificação de uma propriedade que se conserva, U ou H, donde,

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 \quad \text{ou} \quad \Delta H_1 + \Delta H_2 = 0$$

(b) identificação da temperatura como única variável independente do processo, através de considerações a respeito da constância das demais variáveis; então, poder-se-ia escrever

$$m_1 c_{V,1} \Delta T_1 + m_2 c_{V,2} \Delta T_2 = 0 \quad \text{ou} \quad m_1 c_{P,1} \Delta T_1 + m_2 c_{P,2} \Delta T_2 = 0$$

e proceder aos cálculos. Porém, nenhum aluno fez menção à energia interna ou à entalpia ao resolver o problema.

Uma possível explicação para as respostas obtidas é a aprendizagem mecânica da resolução deste problema a partir da bibliografia indicada no curso de Física Geral, um notável exemplo de aplicação da teoria do calórico [137]. Em geral, esta disciplina é cursada no semestre anterior à Físico-Química I e os alunos ainda poderiam ter boa

[137] HALLIDAY, Fundamentos de Física, v.2, p. 184.

lembrança. Coerentemente com o nível de exigência das avaliações, teriam memorizado apenas o procedimento matemático da resolução, sem compreender o fenômeno e as razões porque empregaram aquelas equações e não outras. Esse comportamento não é exclusivo dos nossos alunos mas, reconhecido em estudos sobre resolução de problemas [¹³⁸].

PROBLEMA: EXPANSÃO ISOTÉRMICA DE GÁS

Um mol de gás, inicialmente a 300K e 10atm, é expandido isotermicamente contra uma pressão de oposição constante e igual a 1atm. Calcular Q e W.

Mais da metade dos alunos (56%) respondeu a questão, o que é adequado para identificar os procedimentos de resolução. Entretanto, é notório que muitos alunos desconheciam ou não lembraram como responder o problema.

Não foi possível enquadrar as respostas em alguns poucos padrões de resolução porque cada um organizou sua resposta de modo próprio. Entretanto, similarmente ao acontecido com o problema anterior, a maioria das respostas continha apenas expressões matemáticas e cálculos. Alguns poucos fizeram mais que isso. As transcrições a seguir ilustram os procedimentos dos alunos.

Aluno AI5

$Q = W$	$PV = nRT$	$P_1V_1 = P_2V_2$
$W = P \Delta V$	$10.V = 1.0,82 (300)$	$10.2,46 = 1.V_2$
$W = 1.(24,6 - 2,46)$	$V = 2,46 L$	$V_2 = 24,6$
$W = 22,14 J$		

[¹³⁸] LYTHCOTT, Jean. Problem Solving and requisite knowledge in chemistry. *Journal of Chemical Education*, v.67, p.248-252, 1990. SAWREY, Barbara A. Concept learning versus problem solving. *Journal of Chemical Education*, v.67, p.253-254, 1990. PICKERING, Miles. Further studies on concept learning versus problem solving. *Journal of Chemical Education*, v.67, p.254-255, 1990.

 Aluno D5

$$P_0 V_0 = P_f V_f$$

$$dW = (nRT/V) dV$$

$$10V_0 = 1V_f$$

$$W = nRT \int dV / V$$

$$V_f / V_0 = 10$$

$$W = nRT \ln (V_f / V_i)$$

$$dW = PdV \quad PV = nRT \quad P = nRT / V$$

$$W = 1.0,082.300. \ln 10$$

Sistema isotérmico: $\Delta U = 0 \Rightarrow$ variação de energia interna

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow Q = W$$

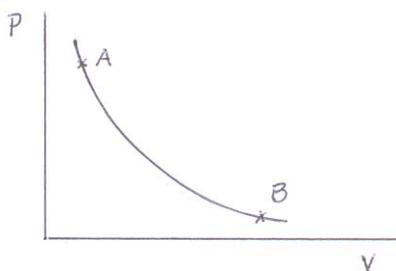
 Aluno Si8

$$C_0 = 1 \text{ mol}$$

$$T_0 = 300 \text{ K}$$

$$P_0 = 10 \text{ atm}$$

$$Q = m c \Delta T$$



isotermicamente
a mesma temperatura

$$PV = nRT \quad \text{Gás}$$

Como a quantidade de calor depende da variação de temperatura, e como não se tem variação de A para B, então $Q = 0$.

$$10 \cdot V = 0,082 \cdot 300$$

$$W = \int PdV =$$

$$10V = 8,2 \cdot 3 \quad 10V = 24,6 \quad V \cong 2,5$$

$$nRT \ln (V_f / V_i) =$$

$$\Delta E = - W$$

Pela 1ª lei temos que a variação de energia interna é igual a quantidade de calor menos o trabalho realizado $\Delta E = \Delta Q - \Delta W$.

Como Q é igual a zero, portanto temos que $\Delta E = - W$.

 Aluno Ar8

Estado inicial do sistema
Estado final do sistema

$$T_1 = \text{temperatura inicial} = 300K \quad T = K \quad \rightarrow \quad T_2 = T_1 = 300K$$

$$P_1 = \text{pressão inicial do sistema} = 10\text{atm} \quad \text{-----} \quad P_2 = \text{pressão final} = ?$$

$$N = \text{número de moles} = 1\text{mol}$$

$$V_2 = nRT / P_2 = 24,6L$$

$$P_{\text{ext}} = \text{pressão externa} = 1\text{atm}$$

$$V_1 = ? \quad \Rightarrow \quad V_1 = nRT_1 / P_1 = 1.0,082.300/10 = 2,5L \quad P_2 = P_{\text{ext}}$$

Variação de energia interna:

$$\Delta E = Q - W, \text{ como o processo é isotérmico } Q = 0 \text{ então } \Delta E = -W, \text{ porém } dW = P_{\text{ext}} dV$$

Em uma parcela significativa das resoluções apresentadas foi considerado que não houve variação de energia interna do sistema. Os alunos escreveram simplesmente $\Delta U = 0$ ou fizeram associação com a constância de temperatura através de expressões como:

- *Num processo isotérmico a energia interna não varia, logo $\Delta U = Q - W = 0$*
- *$\Delta U = 0 \rightarrow$ processo isotérmico*
- *Isotermicamente: $\Delta U = 0$*

Outros consideraram $Q = 0$. As tentativas de justificar esta afirmativa foram feitas por associação entre temperatura constante e troca de calor nula, expressa de modo semelhante à relação entre variação de energia interna e temperatura.

Portanto, na absoluta maioria dos casos não foi apresentada qualquer argumentação em favor das associações entre temperatura e calor ou variação de energia inter-

na. Acreditamos que essas associações tenham sido fruto de aprendizagem mecânica devido à carência de substância exibida.

Somente um aluno usou a expressão $\Delta U = C_v \Delta T$ para basear sua afirmativa de que $\Delta U = 0$. Durante as aulas outros alunos manifestaram conhecer a mesma equação mas, não sabiam sua origem. Tratava-se de uma fórmula própria para cálculos, cujo significado ignoravam.

Dois alunos empregaram $Q = m c \Delta T$ como justificativa para $Q = 0$. Mesmo no âmbito da teoria do calórico, a qual pertence a equação, a justificativa está incorreta. Seu emprego pelos alunos demonstra o desconhecimento acerca das interações sistema/vizinhança durante os processos isotérmicos, pois a garantia da manutenção do valor da temperatura é a possibilidade da troca de calor.

Esse desconhecimento se estendeu a todos os alunos. Nas aulas, quando questionados a respeito de como realizar em laboratório um processo isotérmico, a resposta mais freqüente que obtivemos foi: *mantendo a temperatura constante*. Como fazê-lo, não sabiam. Que princípios da termodinâmica estavam envolvidos, desconheciam. E no entanto, calculavam um processo isotérmico de expansão de gás. Um contra-senso que evidencia a mecanização da resolução de problemas.

Todos consideraram o gás com comportamento ideal, embora o enunciado fizesse referência apenas a “um mol de gás”, sem especificar que o mesmo seria perfeito. O fato, como pudemos descobrir, é que os alunos usaram a única equação de estado que conheciam.

Um outro aspecto notável das respostas é o emprego de duas expressões para o cálculo do trabalho, a saber:

$$W = P \Delta V \quad \text{e} \quad W = nRT \ln (V_2/V_1)$$

Não foi explicado o porque dessa ou daquela expressão. Embora muitos conhecessem a definição formal de trabalho ignoravam como aplicá-la a um processo de expansão de gás. Ao que parece, cada um usou a expressão que pode recordar.

As resoluções de problemas prévias ao ensino, realizadas por aplicação de equações sem conexão explícita com o fenômeno físico, indicam a associação mecânica entre fórmulas e enunciados das questões, de modo parcial (p. ex.: processo isotérmico, $\Delta U = 0$) ou total, como no caso do problema sobre troca de calor.

Em vista desses resultados, orientamos o ensino de resolução de problemas no sentido da elucidação das relações conceituais entre a descrição fenomenológica, textual, dos fenômenos físicos e a descrição matemática, formal, dos mesmos fenômenos. Em cada problema, iniciamos a discussão pelas interações sistema/vizinhança e a mudança de estado do sistema decorrente; discutimos procedimentos para execução do processo em laboratório; e finalmente, chegamos à descrição matemática específica para o caso em estudo a partir de equações mais gerais.

4.3.2 RESOLUÇÕES DE PROBLEMAS POSTERIORES AO ENSINO

Na primeira vez em que experimentamos a nova metodologia de ensino, os alunos demonstraram aprendizagem significativa da termodinâmica ao explicitar claramente novas relações conceituais através de discussões das interações sistema/vizinhança e mudanças de estado dos sistemas nas resoluções de problemas.

A primeira avaliação foi realizada após o ensino da primeira lei da termodinâmica

mas, antes da discussão das propriedades termodinâmicas como funções de várias variáveis. As equações se limitavam à expressão de origem fenomenológica $\Delta U = Q - W$, à definição da entalpia $H = U + PV$ e à definição do trabalho em termos da pressão aplicada e da variação de volume do sistema.

As respostas a um dos problemas propostos ilustram o desenvolvimento cognitivo dos alunos em termos da discussão dos fenômenos termodinâmicos.

PROBLEMA: AQUECIMENTO ISOBÁRICO DE GÁS

Um mol de gás é aquecido isobaricamente em sistema fechado. Avalie qualitativamente Q , W , ΔU , ΔH .

Aluno Gs4

Como a pressão do sistema é constante, sendo este sistema fechado o trabalho W , realizado nas vizinhanças será o produto $p \cdot \Delta V$ onde dependerá da variação de volume. O calor, seguindo a equação $dE = dQ_P - pdV$, que é extraído das vizinhanças é igual a variação da Entalpia do sistema ΔH . Essas variações de Entalpia não significam variações na energia interna do sistema (ΔU). ΔU só pode ser conhecida sabendo-se Q_P (valor do calor) e a variação do volume do gás ΔV . (...)

Aluno Mu4

Primeiramente consideremos o um mol de gás o sistema. Se o sistema foi aquecido, existiu transferência de energia das vizinhanças para o sistema sob a forma de calor. A vizinhança transformou parte de sua energia interna em calor, e por sua vez o calor foi transformado em energia interna do sistema. O aumento da energia interna do sistema de "manifestou" por um aumento da temperatura e por um possível

aumento da pressão, o que não aconteceu pois o sistema foi aquecido isobaricamente. Se não ocorreu um aumento de pressão conseqüentemente o volume teve que aumentar, demonstrando que parte da energia interna do sistema foi transformada em trabalho que por sua vez foi transformado em energia interna da vizinhança. (...)

Aluno Ed4

Segundo o Primeiro Princípio: $\Delta U = Q - W = \int PdV - W'$.

Se a transformação é isobárica, então a pressão é constante.

Considerando a mudança de estado uma transformação termelástica ($W' = 0$).

O calor envolvido no processo de aquecimento do gás (Q) vai ser transformado em energia interna do sistema (gás). Isto é, a energia interna do gás vai aumentar. Uma parte do calor envolvido no processo de aquecimento do gás vai ser transformado em trabalho de expansão do gás ($W = \int PdV$) e uma outra parte vai ser transformada em energia interna do sistema (gás), logo: $Q = \Delta U + W$.

A variação de energia interna do sistema vai ser: $\Delta U = Q - W = Q - P \Delta V$.

É importante observar que tanto o calor (Q) quanto o trabalho (W) envolvidos no processo só existem na fronteira do sistema e permanece só enquanto durar o processo. (...)

Estes exemplos representam os tipos de respostas à questão. Houve quem explicasse pouco como o aluno Gs4, evidenciando falta de conhecimento do fenômeno. Sua explicação girou em torno das relações matemáticas.

O aluno Mu4 explicou o processo por intermédio de uma cadeia causal coerente com a idéia de formas de transferir energia, referida na discussão dos mapas conceituais. Sua resposta foi adequada à avaliação pedida no enunciado.

Já o aluno Ed4 discutiu de modo mais esquemático, estabelecendo relações entre a descrição qualitativa do processo e expressões matemáticas pertinentes, num bom equilíbrio.

Examinando os resultados do teste de conhecimento prévio ao ensino verificamos que houve um avanço no que toca à descrição dos fenômenos termodinâmicos. O aluno Gs4 descreveu muito pouco do processo porém, exibiu algum conhecimento de transferência de energia ao se referir ao *calor extraído das vizinhanças*. Os outros dois alunos demonstraram possuir não só o conceito de transferência de energia como o de conversão de energia. No início do curso os alunos não sabiam estabelecer relações causais em termodinâmica, poucos possuíam noções de conversão e transferência de energia.

Os alunos demonstraram capacidade de discussão, embora com algumas dificuldades em exprimir seu pensamento. Isso se deve não apenas à falta de clareza à cerca das relações entre os conceitos termodinâmicos, mas também, à falta de prática em expressar-se de modo preciso. Como já vimos, resolver problemas consistia apenas em aplicar equações, sem que para isso fosse necessário relacioná-las ao fenômeno ou mesmo, conhecê-lo.

Em avaliação subsequente, solicitamos a resolução de um problema que envolvia troca de calor, similar a uma das questões respondidas no teste de conhecimento prévio ao ensino.

PROBLEMA: TROCA DE CALOR

Cem gramas de água, a 80°C, são misturadas com 50g de água a 20°C. Considerando que o sistema não troca energia com as vizinhanças, qual o seu estado final?

 Aluno Gs4

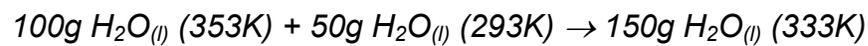
(...) [dados do enunciado]

$$\Delta U = 0$$

Considerando que não é troca de energia

$$t_{eq} = (m_1 t_1 + m_2 t_2) / (m_1 + m_2) = (100 \cdot 353 + 50 \cdot 293) / 150$$

$$t_{eq} = 333K$$


 (...) [cálculos de ΔH e ΔS]

 No estado final temos 150g H₂O(l) a 333K (...)

 Aluno Ed4

$$\theta_1 = m_1 c \Delta T = 100 \times 1 \times (T_j - 353)$$

$$\theta_2 = m_2 c \Delta T = 50 \times 1 \times (293 - T_j)$$

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (\dots) \text{ [cálculos de } T_j]$$

$$T_j = 333K = 60^\circ C$$

 (...) [cálculos de ΔS]

 Aluno Mu4

100g	50g
80°C	20°C

Como o sistema é isolado, temos

$$\sum \Delta U = 0$$

$$dU = (\partial U / \partial T)_V dT + (\partial U / \partial V)_T dV, \text{ como para líquidos } dV = 0$$

$$dU = C_V dT$$

Para as 100g de H₂O a 80°C, temos

$$\Delta U = \int 1dT \Rightarrow \Delta U = (T - 80) \text{ cal/g} \Rightarrow \Delta U = (T - 80) \cdot 100\text{ml}$$

Para as 50g de H₂O a 20°C, temos

$$\Delta U = \int dT \Rightarrow \Delta U = (T - 20) \text{ cal/g} \Rightarrow \Delta U = (T - 20) \cdot 50\text{ml}$$

Como $\sum \Delta U = 0$

$$100 (T - 80) + 50 (T - 20) = 0$$

$$150T = 3000$$

$$T = 60^\circ\text{C}$$

Os dois primeiros exemplos representam as respostas obtidas. De modo geral os alunos não explicaram o raciocínio empregado na resolução do problema. Usaram as expressões conhecidas, sem qualquer justificativa, e realizaram os cálculos.

O terceiro exemplo (Mu4) foi uma das duas exceções encontradas. O aluno iniciou sua resposta com a análise termodinâmica do sistema; usando uma expressão da energia interna própria para sistemas fechados, reduziu-a ao caso particular por consideração da incompressibilidade do líquido, chegou à equação final e calculou o valor da temperatura final do sistema. Apenas não especificou o estado final de modo completo.

Esses resultados nos surpreenderam porque, a julgar pelas respostas do problema sobre aquecimento isobárico de gás, os alunos teriam competência, uns mais, outros menos para justificar a escolha das equações empregadas na resolução da questão relativa à troca de calor.

Além disso, o exame dos mapas conceituais indicou que a maioria dos alunos adotou uma estrutura conceitual da primeira lei da termodinâmica adequada, dos tipos E (Q U W) e E U (Q W). Nas relações conceituais estabelecidas predominaram as idéi-

as de formas de energia e conversão, fazendo supor que teriam assimilado o conceito de conservação. Então, esperávamos que esses alunos respondessem à questão do mesmo modo que o aluno Mu4.

Contudo, verificamos que a explicação do raciocínio também não aconteceu nos demais problemas que requereram cálculos: fórmulas foram aplicadas e resultados numéricos fornecidos.

Por outro lado, nas questões dissertativas sem cálculos a realizar, os alunos não se furtavam à argumentação, mesmo apresentando imprecisões de linguagem ou cometendo erros. Nas aulas de discussão de problemas o mesmo acontecia.

As razões porque os alunos não explicaram o raciocínio nos problemas que envolveram cálculos parecem ser duas: em primeiro lugar, a falta de reconhecimento das expressões matemáticas como descrições dos fenômenos termodinâmicos; por isso desconheciam que a aplicação de uma ou outra equação está vinculada ao processo particular em estudo. Como não saberiam deduzir as expressões memorizadas a partir de informações sobre o processo, não poderiam justificar seu emprego. Então, buscariam associar equações com termos específicos, por exemplo: expressões de ΔU , Q e W para processos isotérmicos, isobáricos, adiabáticos, reações químicas, etc. sem perceber que todas são casos particulares de uma expressão geral.

A segunda razão parece ser uma diferenciação desenvolvida ao longo dos anos de escolaridade: problemas que envolvem cálculos seriam resolvidos por aplicação de fórmulas; problemas dissertativos, conhecidos como “questões teóricas”, seriam resolvidos por discussão. A exigência de cálculos ou não, indicaria quais os procedimentos a adotar.

Esses resultados nos demonstraram que o ensino não havia facilitado a correspondência entre as descrições textual e matemática dos fenômenos físicos [¹³⁹]. Resolvemos enfatizar este ponto nas aulas de discussão de problemas. Incluímos a discussão sobre sistemas e processos nas Notas sobre Termodinâmica Básica, procurando esclarecer os mecanismos físicos das mudanças de estado, quais as variáveis independentes e dependentes.

Na segunda vez que experimentamos nossa metodologia de ensino, modificamos o enunciado do problema sobre troca de calor na prova, transformando-se em questão dissertativa. Usamos uma transformação corriqueira, conhecida dos alunos: a fusão de um cubo de gelo em um vaso com água deixado no laboratório. Orientamos a resolução dividindo a resposta em duas partes: descrição do processo e avaliação das transferências e variações de energia. Com isso esperávamos obter melhores informações sobre o raciocínio dos alunos ao resolver o problema e identificar as dificuldades em respondê-lo de modo correto. A nova redação ficou do seguinte modo:

PROBLEMA: TROCA DE CALOR

Cem gramas de água, à temperatura ambiente (30°C) e 50g de gelo (-5°C) são colocados em um bequer sobre a bancada do laboratório.

- ♦ **Explique, justificando, o processo que irá ocorrer e avalie a temperatura, a pressão, o volume e a(s) quantidade(s) de substância do sistema no estado final.**

[¹³⁹] SILVA, José Luis P. B. Estrutura cognitiva e resolução de problemas. *Anais da 18ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. [São Paulo] : S B Q, 1995. [Não paginado].

- ◆ **Analise as trocas de energia que ocorrerão durante o processo, bem como as variações de energia interna do sistema e das vizinhanças, atribuindo-lhes sinais conforme as convenções estabelecidas.**

As modificações feitas no enunciado produziram os resultados desejados. A maioria dos alunos discutiu o fenômeno extensamente. Entretanto, um estudante ignorou o novo enunciado: usou o procedimento padrão e depois discutiu os resultados numéricos encontrados.

A primeira parte da resposta do problema requeria o conceito de desequilíbrio como causa do processo de transferência de energia, o que todos menos um dos alunos mostraram conhecer.

- *Inicialmente, o sistema possui água e gelo, que apresentam temperaturas diferentes. Assim, essa diferença de temperatura causará uma troca de energia em forma de calor entre os dois componentes que terminará quando o equilíbrio térmico (estado onde haverá igualdade de temperatura entre os componentes) for atingido.*
- *Ao colocar água a uma temperatura de 30°C e colocar gelo a uma temperatura de -5°C , ocorrerá um escoamento de calor da substância de maior temp. para a de menor temp., até que atinjam a temp. de equilíbrio, no caso o escoamento será da água para o gelo.*

Todos concordaram em que haveria um estado de equilíbrio com temperatura diferente das iniciais, porém, a maior parte dos alunos não considerou seu valor como o da temperatura ambiente. Houve quem afirmasse ser 25°C , 0°C , entre -5°C e 30°C , próxima à temperatura ambiente e quem preferisse não avaliar a temperatura final, apenas afirmando que o sistema atingiria uma temperatura de equilíbrio.

A falta de identificação entre a temperatura final do sistema e a temperatura ambiente demonstrou a desvinculação entre o processo citado no problema e o processo real, experimentado por todos os alunos. Parece-nos que o problema teve significação apenas como tarefa escolar, sem relação com os acontecimentos do mundo real. Se foi assim, todo o conhecimento relacionado a essa tarefa foi aprendido mecanicamente, relacionando-se arbitrariamente com o conhecimento utilizado na vida diária dos estudantes.

Nossa hipótese é que a resolução deste tipo de questão, aprendida mecanicamente desde o ensino médio, é resistente à mudança. O contato térmico entre sistema e meio ambiente teria passado despercebido pois o caso típico é do sistema termicamente isolado. Habitados a um procedimento padronizado que adquiriu significado pelo sucesso obtido em outras avaliações escolares, resistiriam à criação de uma resolução diferente, adequada à situação posta pelo problema da prova. As temperaturas de equilíbrio diferentes de 30°C seriam resultado de tentativas de adequar o problema da prova ao problema mecanicamente memorizado.

As respostas à segunda parte da questão também demonstram resistência à mudança. Apesar de não empregar uma expressão matemática sequer nas respostas (exceto no caso mencionado) em geral, as análises realizadas pelos estudantes acerca das trocas de energia foram fundamentadas em trocas de calor.

- (...) *Tendo-se como causa a diferença de temperatura entre o gelo e a água, dá-se início à conversão de energia interna da água em energia interna do gelo. Esta conversão se dá por etapas onde a energia interna da água converte-se em energia em forma de calor, que surgiu devido a diferença de temperatura entre o gelo e a água,*

o calor então eleva a temperatura do gelo transformando-se em energia interna do gelo. Temos então, $\Delta U_{\text{água}} < 0$ $\Delta U_{\text{gelo}} > 0$. (...)

- *(...) A água transfere parte de sua energia interna em forma de calor para o gelo, e ao mesmo tempo, o gelo vai transferindo toda a sua energia interna pois ele está perdendo massa onde encontra-se concentrada toda sua energia interna (esse processo é denominado transferência de massa). Entre o sistema e a vizinhança, haverá também variação de energia interna, devido à transferência de calor. Assim, a vizinhança está transferindo parte de sua energia interna para o sistema e esta transferência se dá em forma de calor. Portanto, a energia interna da vizinhança será menor no final do processo.*

Poucos alunos raciocinaram em termos da conservação da energia e/ou relacionaram as variações de energia interna às variações de temperatura dos sistemas. O princípio implícito na discussão do problema permaneceu o mesmo que na resolução matemática: a conservação do calor. Assim, as variações de energia interna corresponderiam a calores recebidos e cedidos pelas partes do sistema.

Enfim, salvo algumas exceções, não observamos mudanças substantivas na resolução deste problema que indicassem a aprendizagem significativa da termodinâmica. Consideramos a resistência dos alunos localizada, pelos motivos expostos acima, e porque verificamos mudanças em outros tipos de problemas, que discutiremos em seguida.

Na segunda vez que experimentamos nossa proposta de ensino, incluímos também um problema de variação de pressão (expansão isotérmica de gás) no teste de conhecimento prévio, na expectativa de que pudesse servir como indicador da aprendizagem significativa dos alunos. (Os processos de mudança temperatura e pressão es-

tão entre os de maior interesse, em nossa disciplina, porque o rendimento das reações químicas depende das condições de temperatura e pressão em que são realizadas.)

Para efeito de comparação, usamos um problema de variação de temperatura (aquecimento isobárico de gás) em prova realizada após o ensino das equações das funções termodinâmicas.

Neste caso, os alunos responderam explicando seus raciocínios. Nos exemplos que apresentamos a seguir as mudanças de resolução em relação ao teste de conhecimento prévio são evidentes (ver respostas de Sr5 e D5 ao problema sobre expansão isotérmica de gás, antes do ensino).

PROBLEMA: AQUECIMENTO ISOBÁRICO DE GÁS

Calcule a quantidade de calor necessária para aquecer uma mistura gasosa contendo oito moles de nitrogênio e dois moles de oxigênio, sob pressão constante de 1atm, de 298 a 1000K. Justifique o emprego das equações, bem como quaisquer considerações feitas.

Aluno Sr5

Considerando sistema fechado, para que não haja variação de composição (n° de moles); flexível para que o gás possa expandir a fim de manter equilíbrio mecânico; diatérmico para que possa haver troca de calor. E considerando os gases como ideais para que possa valer a relação $PV = nRT$.

Sabendo-se que a variação de energia interna tem mesmo valor para a equação que relaciona sistema/vizinhança ($\Delta U = Q - W$) como para a equação referente apenas ao sistema ($\Delta U = \Delta H - P\Delta V$) é possível fazer a seguinte relação:

$$\Delta H_P = \Delta U + P\Delta V$$

$$W = P\Delta V$$

$$(1) \Delta U = \Delta H_P - P\Delta V$$

$$(2) \Delta U = Q - W$$

igualando (1) e (2) conclui que:

$$Q = \Delta H_P$$

$$dH = C_P dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP$$

$P = \text{constante}$

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT$$

onde $C_P = \text{capacidade calorífica a pressão constante}$.

Significa que a variação de entalpia a pressão constante é igual a quantidade de calor necessária para nesse caso aquecer o sistema de 298 a 1000K. (...)

A resolução do aluno Sr5 representa a resposta típica dos alunos em que o raciocínio foi claro porém, algumas justificativas encontraram-se incompletas ou não foram apresentadas.

Notamos uma tendência dos alunos em abreviar determinados tipos de explicações que consideravam *óbvias*. Em várias oportunidades, nas aulas de discussão de exercícios, demonstraram espanto quando mostramos que as explicações estavam incompletas, obscuras. Um exemplo ilustrativo ocorreu com as equações das funções termodinâmicas. Foi acordado que o cálculo das variações das propriedades termodinâmicas deveria ser realizado a partir de expressões como funções de várias variáveis, tipo $U = U(T, V, n_i)$, $H = H(T, P, n_i)$, etc. No decorrer da resolução essas expressões deveriam ser reduzidas aos casos particulares correspondentes às condições do processo em questão. Então, vários alunos (inclusive Sr5) consideraram a composição do sistema constante em dado ponto da resposta e em outro lugar escreveram as equações do caso particular, $U = U(T, V)$, $H = H(T, P)$, etc., sem fazer a necessária ligação entre as duas afirmações. Segundo os alunos, a relação seria óbvia.

A justificativa incompleta da expressão do trabalho foi também freqüente. Muitos alunos (entre os quais Sr5) consideraram suficiente afirmar a isobaricidade do processo como explicação de que o trabalho se calcularia por $W = P\Delta V$. Julgaram desnecessário mostrar como chegar a este resultado partindo da definição de trabalho pois seria apenas uma trivial operação matemática de integração. O argumento foi a unicidade do procedimento, o que é verdade. A dificuldade dos alunos encontrou-se em perceber que o procedimento matemático único foi determinado pelas condições físicas do problema.

Este tipo de resistência é difícil de remover porque depende de um interesse maior pela formulação teórica, algo que poucos alunos manifestam à altura do terceiro ou quarto semestre do curso, período em que costumavam cursar nossa disciplina.

Entretanto, o aluno D5 apresentou uma resposta detalhada e com justificativas completas como desejaríamos que tivesse ocorrido com a maioria dos alunos.

Aluno D5

Análise do problema : Caracterizando o sistema e sub-sistemas:

Sistema fechado, pois o sistema consiste numa mistura gasosa; flexível, pois se fosse fixo a pressão não seria constante pois está havendo aquecimento da mistura, ou seja, o sistema precisa ser flexível para manter o equilíbrio mecânico; diatérmico, pois permite interação térmica entre sistema e vizinhança.

(b) Caracterizando o processo:

b₁. Quanto às formas de energia transferida:

Calor: Uma vez que há variação de temperatura no processo isobárico

Trabalho: Devido à variação de volume causada pela variação de temperatura

$\sum u_i dm_i = 0$ porque o sistema é fechado

b₂. Quanto às variações das propriedades do sistema:

ΔT	ΔP	ΔV	Δn
702K	0	>0	0

Variação de composição é nula porque não ocorre mistura, mudança de fase ou reação

Formas particulares das equações:

(...) $dU = dQ - PdV$ pois não há transferência de energia interna em forma de massa.

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V, n_i} dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{T, n_i} dV + \sum_i \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_{ki}} dn_i$$

[indicou que o último termo se anula] pois não há variação de composição (...)

Assim, temos:

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - P \right] dV$$

Considerando a mistura de gases ideais vai facilitar a resolução do problema pois a relação PVT pode ser escrita pela equação $PV = nRT$

$$\Rightarrow C_P - C_V = R \quad C_V = C_P - R \quad (\text{para 1 mol})$$

(...) Gás ideal $PV = nRT$ $(dP/dT) = nR/V$

$$\left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V - P \right] = \frac{TnR}{V} - P = 0$$

$$dU = (C_P - R) dT \quad (...)$$

Cálculo do trabalho:

$W = \int P_{op} dV$, como a pressão de oposição é constante, temos que:

$$W = P_{op} \int dV \quad W = P_{op} \Delta V \quad (...)$$

$$\Delta U = Q - W \quad Q = \Delta U + W \quad Q = (...)$$

Geralmente, as relações entre a descrição fenomenológica e a descrição matemática do processo ficaram ainda a desejar, embora tivesse havido um avanço enorme nessa direção desde o início do curso.

Na terceira experiência que realizamos procuramos esclarecer ainda mais as relações entre os dois modos de descrever um processo. Tanto nas aulas expositivas quanto nas discussões de problemas enfatizamos a correspondência entre a mudança de estado físico e sua representação matemática.

No teste de conhecimento prévio ao ensino, empregamos apenas um problema sobre expansão isotérmica de gás. Na prova realizada após o ensino da formalização da termodinâmica, utilizamos um problema sobre expansão isotérmica de gás e outro sobre aquecimento isobárico de gás.

O enunciado da questão na prova foi modificado para incluir a indicação de como proceder com as equações e algumas informações a respeito do sistema. Julgamos que desse modo direcionaríamos o raciocínio dos alunos e poderíamos verificar a aprendizagem da correspondência entre as descrições textual e formal.

PROBLEMA: EXPANSÃO ISOTÉRMICA DE GÁS

Calcular Q, W, ΔU (...) para o processo indicado abaixo. Iniciar a resolução dos problemas a partir de equações gerais do tipo

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i$$

e aplicá-las aos casos particulares, simplificando-as antes de proceder os cálculos. Se for impossível calcular, deduzir as expressões simplificadas para fazê-lo e explicar a impossibilidade.

Considerar que os gases obedecem à equação $PV = nRT$, que as capacidades caloríficas são funções polinomiais da temperatura e que a composição é constante.

Cinco moles de $\text{CO}_2(\text{g})$, inicialmente a 300K e 10atm, são expandidos isotermicamente contra uma pressão de oposição constante e igual a 1atm.

Ao simplificar a expressão de variação da energia interna os alunos estabeleceram correspondências entre condições de realização do processo dadas no texto do enunciado e termos da equação.

- (...) Para calcularmos ΔU utilizaremos a equação geral:

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i$$

Como não há variação na composição o último termo será nulo. Como se trata de um processo isotérmico, a temperatura não irá variar e assim o primeiro termo também será nulo. Assim:

$$dU = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV. \quad (...)$$

- (...) Para o valor de ΔU , usaremos a equação

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i$$

como o sistema é fechado (composição constante), temos $\sum_i \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i = 0$

e no processo isotérmico $\int_{T_1}^{T_2} C_V dT = C_V \Delta T = 0$ pois a temperatura é constante. Ficamos

$$dU = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV \quad (...)$$

Usando a equação de estado do gás ideal chegaram à conclusão que a variação de energia interna do sistema durante o processo é nula.

□ (...) Utilizando a equação $PV = nRT$ calculamos $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i}$:

$$P = \frac{nRT}{V} \rightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} = \frac{nR}{V}, \text{ assim}$$

$$dU = \left[\frac{nRT}{V} - \frac{nRT}{V} \right] dV$$

$$dU = 0 \rightarrow \text{logo: } \Delta U = 0. (...)$$

□ (...) gás ideal $PV = nRT \Rightarrow P = nRT/V \Rightarrow (dP/dT) = nR/V$

$$dU = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV \Rightarrow dU = [P - P] dV \Rightarrow dU = 0 \Rightarrow \Delta U = 0. (...)$$

Este modo de resolver os problemas pressupõe a existência de uma hierarquia dos processos e das equações que os descrevem. As expressões matemáticas do tipo $U = U(T, V, n_i)$ representam processos em que podem variar composição, temperatura e volume do sistema, que são os casos mais gerais de mudança de estado e de equação das funções termodinâmicas que estudamos em nossa disciplina. Com a orientação de iniciar a resolução dos problemas com a equação referente ao caso geral e proceder sua redução ao caso particular posto pelo enunciado da questão, pretendemos estabe-

lecer um procedimento de diferenciação progressiva dos processos e das equações correspondentes.

A diferença entre as respostas anteriores e posteriores ao ensino é imensa. No início do curso, a invariância da energia interna foi afirmada com base na constância da temperatura do sistema (p. ex.: *processo isotérmico* $\rightarrow \Delta U = 0$). A relação entre energia interna e temperatura do gás pode ser considerada como arbitrária pois, os alunos empregaram a equação $\Delta U = C_V \Delta T$ desconhecendo seu significado como uma parcela da equação geral ou seja, a variação de energia interna quando a composição e o volume do sistema são mantidos constantes.

Após o ensino os alunos mostraram, a partir da equação geral, que num processo realizado a temperatura e a composição constantes, a energia interna é função apenas do volume. Em seguida, demonstraram que no caso particular do sistema ser constituído por gás ideal a variação de energia interna é nula. A correspondência entre os termos do enunciado e os termos da equação geral ficou clara.

O cálculo do trabalho realizado pelo sistema também apresentou mudanças em relação ao início do curso. As respostas do teste de conhecimento prévio mostraram o emprego injustificado de duas expressões $W = P \Delta V$ e $W = nRT \ln (V_2 / V_1)$.

Após o ensino, quase a totalidade dos alunos empregou a equação adequada, $W = P \Delta V$. Alguns justificaram-na de modo claro

□ (...) Sabemos que $dW = PdV$ pois só existe trabalho de expansão. Então, $W = \int PdV$ como a pressão externa é constante: $W = P \int dV \Rightarrow W = P \Delta V$ (...)

porém, a maioria julgou que a referência à pressão externa na expressão do trabalho, $W = P_{ex} \Delta V$, seria suficiente para justificá-la.

A quantidade de calor envolvida no processo foi, em geral, determinada por intermédio do trabalho

- (...) Então, tendo em mãos ΔU e W é possível calcular o valor de Q utilizando: $\Delta U = Q - W$ [$\Delta U = 0$] $\Rightarrow Q = W$ (...)

A maioria dos alunos (cerca de 70%) respondeu a esta questão do modo descrito acima, com as variações de estilo próprias de cada um. A execução desses procedimentos pelos alunos constitui evidência de aprendizagem significativa facilitada por nossa proposta de ensino pois, os problemas resolvidos que são apresentados em livros-textos de termodinâmica, sejam de física ou físico-química, não exibem a mesma linha de resolução e o mesmo nível de detalhe das respostas dos alunos.

A clareza das relações conceituais construídas transparece na articulação das idéias dos alunos, exemplificada pela resposta do aluno Ar8, transcrita a seguir. Para efeito de comparação, observe-se a resolução que este mesmo aluno forneceu ao problema no início do curso.

Aluno Ar8

(...) *Resolução:*

Estado inicial: inicialmente tem-se CO₂ em estado gasoso (g) a uma pressão de 10 atmosferas (10atm), com temperatura de 300 Kelvin (300K) com um certo volume V₁ e 5 moles de composição. A fim de se achar V₁ utilizarei a equação dos gases perfeitos, já que no enunciado da página 1 estabeleceu-se esta condição P₁V₁ = nRT₁, portanto V₁ = nRT₁/P₁ (...), portanto o estado inicial do CO₂ será: g, 5moles, 10atm, 300K, contra uma pressão constante de 1atm, V₁ = 12,3L.

Estado final de CO₂: estado de agregação gasoso, 5 moles de composição, pressão final = 1atm, V₂ desconhecido e temperatura final de 300K (pois o processo é isotérmico). Cálculo de V₂: $V_2 = nRT_2 / P_2$ (...) ⇒ estado final: g, 1atm, 5moles, T₂ = 300K, V₂ = 123,1L.

Cálculo de ΔU: a variação de energia interna será calculada a partir da equação (9) do formulário de equações correlacionada com as equações (36) e (41) do mesmo. A expressão é a seguinte:

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i$$

Como o processo se desenvolve a temperatura e composição constante a equação se reduzirá à seguinte forma:

$$dU = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV$$

Como o gás é ideal $P = \frac{nRT}{V}$, portanto $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} = \frac{nR}{V}$,

então $dU = \left[\frac{nRT}{V} - P \right] dV$, portanto $\Delta U = 0$.

Cálculo do trabalho: $W = \int PdV = P (V_2 - V_1)$ (...).

Como $\Delta U = 0$, pela primeira lei da termodinâmica $\Delta U = Q - W$ (expressão para um sistema fechado), então adaptando nesta situação $0 = Q - W$ $Q = W$ (...)

As respostas dos alunos ao problema sobre aquecimento isobárico de gás também evidenciaram aprendizagem significativa da termodinâmica. A questão foi aplicada na mesma avaliação que o problema sobre expansão isotérmica de gás discutido acima. Usamos um só enunciado básico, substituindo a especificação do processo.

PROBLEMA: AQUECIMENTO ISOBÁRICO DE GÁS

Calcular Q, W, ΔU (...) para o processo indicado abaixo. Iniciar a resolução dos problemas a partir de equações gerais do tipo

$$dU = C_V dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{V, n_i} - P \right] dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i$$

e aplicá-las aos casos particulares, simplificando-as antes de proceder aos cálculos. Se for impossível calcular, deduzir as expressões simplificadas para fazê-lo e explicar a impossibilidade.

Considerar que os gases obedecem à equação $PV = nRT$, que as capacidades caloríficas são funções polinomiais da temperatura e que a composição é constante.

Um mol de N_2 é aquecido isobaricamente (1atm) de 298 a 400K.

Aluno Si8

Pressão constante.

Para determinarmos as condições iniciais e finais do sistema, podemos utilizar $PV = nRT$, pois o gás é ideal.

Iniciais

$$P_1 = 1 \text{ atm}$$

$$T_1 = 298 \text{ K}$$

$$V_1 = 24,44 \text{ L}$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

$$V_1 = (\dots)$$

$$P_2 V_2 = nRT_2$$

$$V_2 = (\dots)$$

Finais

Sendo o sistema isobárico a pressão final é igual a inicial $P_2 = 1 \text{ atm}$

$$T_2 = 400 \text{ K}$$

$$n_2 = n_1 = 1 \text{ mol}$$

$$V_2 = 32,8 \text{ L}$$

W

$$\int dW = \int PdV \quad P \text{ é constante então sai da integral} \quad W = P \int dV = P (V_2 - V_1) = (\dots)$$

O trabalho é positivo, pois a variação de volume foi positiva.

$$dH = C_P dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, n_i} \right] dP + \sum \left(\frac{\partial H}{\partial n_i} \right)_{P, T, n_j} dn_i$$

Como a composição é constante

$$\sum \left(\frac{\partial H}{\partial n_i} \right)_{P, T, n_j} dn_i = 0$$

O sistema é isobárico, então não teremos variação de pressão. Com isso,

$$\left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, n_i} \right] dP = 0$$

Ficando $dH = C_P dT$. (...)

$$H = U + PV \text{ (...)}$$

O processo é isobárico e não temos variação de pressão. Então $V\Delta P = 0$

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad P\Delta V = W \quad (...)$$

$$\Delta U = (...) \quad Q = \Delta U + W = \Delta H \quad (...)$$

Cerca de 70% dos alunos respondeu à questão explicando as diversas etapas de sua resolução. Mais da metade seguiu a linha de raciocínio exposta no exemplo, em que calor e variação de energia interna foram obtidos a partir da variação de entalpia. Os demais seguiram procedimento similar ao empregado no problema sobre expansão isotérmica de gás, calculando a variação de energia interna, o trabalho e o calor.

Em suma, na primeira e na segunda experiências de ensino os alunos demonstraram aprendizagem significativa da termodinâmica ao explicitar claramente novas relações conceituais através de discussões das interações sistema/vizinhança e mudanças de estado dos sistemas nas resoluções de problemas. Entretanto, a correspondên-

cia entre as descrições textual e matemática dos fenômenos físicos ficou a desejar.

Na terceira experiência de ensino, além dos alunos repetirem os resultados relativos à discussão de processos termodinâmicos das experiências anteriores, conseguiram também apresentar as relações entre os conceitos físicos e matemáticos de modo claro. Os alunos expuseram o raciocínio empregado na resolução dos problemas que lhes foram propostos, de modo semelhante ao que foi discutido em sala de aula.

Claro está que as relações conceituais exibidas pelos alunos foram aprendidas durante o curso, porque não haviam sido identificadas através dos testes de conhecimento e mapas conceituais prévios ao ensino. A evidência de que a aprendizagem significativa da termodinâmica foi facilitada pelo ensino está na congruência de significados entre os conhecimentos demonstrados pelos alunos e os conhecimentos levados à discussão em sala de aula pelo professor.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação relatamos a formulação e o estudo da contribuição de uma proposta de ensino na facilitação da aprendizagem significativa da termodinâmica. Embora realizado no âmbito de uma disciplina específica, onde detectamos dificuldades na aprendizagem de conceitos termodinâmicos e na resolução de problemas pelos alunos, o trabalho se insere numa discussão mais ampla sobre o ensino da termodinâmica básica que ocorre a nível internacional.

A hipótese norteadora da investigação foi que o ensino praticado na disciplina contribuía para as dificuldades de aprendizagem manifestadas pelos alunos e, por isso, um outro ensino que considerasse essas dificuldades poderia facilitar-lhes a aprendizagem da termodinâmica.

De início identificamos aspectos do ensino tradicional que poderiam dificultar a aprendizagem da termodinâmica e introduzimos algumas mudanças que resultaram em melhor relacionamento dos alunos com o professor e a disciplina, em geral. Entretanto, os problemas de aprendizagem permaneceram. Num segundo momento nos apropriamos duma concepção de ensino fundamentada na teoria da aprendizagem significativa e no modelo de ensino de Gowin, que serviu de esteio para a formulação da nossa proposta de ensino da termodinâmica.

Os conteúdos sobre os quais trabalhamos foram determinados pelo programa da disciplina Físico-Química I e consistiam dos princípios da termodinâmica fenomenológica e sua aplicação ao estudo de sistemas simples e fechados. Construimos suas estruturas através de mapeamento conceitual e elaboramos um texto de discussão da pri-

meira lei da termodinâmica, sistemas e processos, com o objetivo de complementar a bibliografia da disciplina. Para tanto, consideramos os conhecimentos termodinâmicos dos alunos prévios ao ensino, a construção histórica dos conceitos de energia, energia interna calor e trabalho e algumas questões epistemológicas. A organização do conteúdo foi estabelecida segundo o princípio da diferenciação progressiva dos conceitos.

A metodologia de ensino teve na partilha de significados um traço marcante: nas aulas expositivas buscamos relacionar o conhecimento novo ao possuído pelos alunos; nas aulas de discussão de problemas privilegiamos o intercâmbio e a negociação de significados dos conceitos termodinâmicos entre alunos, professor e materiais educativos com vistas à congruência.

Reelaboramos os procedimentos de avaliação de aprendizagem solicitando a explicitação do raciocínio condutor da resolução dos problemas e incluindo mapas conceituais como instrumento de avaliação. Estabelecemos critérios claros para avaliação e os discutimos com os alunos, justificando-os.

Podemos, então, sintetizar a proposta de ensino facilitadora da aprendizagem significativa da termodinâmica como composta das seguintes etapas:

- 1) Explicitação da estrutura conceitual da termodinâmica básica, a ser discutida no processo de ensino-aprendizagem.
- 2) Identificação dos conhecimentos prévios dos alunos, referentes a conceitos termodinâmicos, resolução de problemas e estrutura conceitual da termodinâmica (mapas conceituais).
- 3) Seleção e preparação de materiais educativos.

- 4) Aulas expositivas dos princípios teóricos e aulas de discussão de problemas, visando explicitar as relações conceituais da termodinâmica e a correspondência entre descrição fenomenológica e formal dos processos termodinâmicos.
- 5) Avaliações periódicas da aprendizagem dos conceitos e das resoluções de problemas. Construção de mapas conceituais após o ensino, para identificação de mudanças na estrutura conceitual da termodinâmica.

Para fins dessa dissertação nos limitamos à investigação da aprendizagem significativa da primeira lei da termodinâmica. Os resultados da experimentação de nossa proposta de ensino em sala de aula demonstram a correção da hipótese que levantamos: o ensino pode facilitar a aprendizagem significativa. Os alunos construíram novas e/ou reelaboraram antigas relações entre conceitos, congruentes com o conteúdo ensinado. Especificamente, manifestaram mudanças conceituais em relação à energia, considerando-a como o conceito mais geral da termodinâmica, com características de contenção, transferência e multiformidade. Estabeleceram os conceitos de energia interna, calor e trabalho como formas de energia, diferenciando-os em energia armazenada nos sistemas (energia interna) e em formas de transferir energia (calor e trabalho).

Os alunos também desenvolveram a capacidade de discussão de processos termodinâmicos, tanto no que respeita à descrição fenomenológica, quanto em relação à descrição matemática das interações sistema/vizinhança e das mudanças de estado do sistema. Desse modo, aprenderam a resolver problemas explicando o raciocínio empregado.

Temos claro que com o trabalho realizado mostramos ser possível resolver apenas uma pequena parte do problema de aprendizagem da termodinâmica. Percebemos também que nossa proposta de ensino pode ser melhorada, sob vários aspectos, no

âmbito de nossa competência individual. Um deles é o aprimoramento e a complementação dos textos produzidos, para fins de publicação. O emprego de uma referência bibliográfica cuja organização seqüencial seja similar à empregada no ensino da disciplina pode facilitar a aprendizagem.

Outro ponto que pode ser modificado é o ensino de laboratório. A inclusão de mais experimentos seria desejável. Para tanto, é necessária a preparação das experiências a partir da literatura científica, pois não são encontradas nos livros de ensino de laboratório.

Além disso, a elaboração de materiais instrucionais próprios para o ensino experimental de conceitos específicos como, transferência de calor e trabalho, processos isotérmicos e adiabáticos, entre outros, merece atenção, porque os alunos apresentam dificuldades no seu entendimento. A discussão baseada na vivência de situações experimentais poderia facilitar a aprendizagem.

Outras investigações, entretanto, dependem da vontade política dos órgãos de coordenação acadêmica para realização pois, requerem decisões sobre modificações de programas das disciplinas. Por exemplo, o estudo do aumento do tempo disponível para o ensino da termodinâmica. A (re)construção de relações conceituais demanda um tempo que varia de indivíduo para indivíduo, pois depende do potencial significativo da tarefa, que não é necessariamente o mesmo para cada um. Como o conteúdo programático da disciplina Físico-Química I é muito extenso em relação à sua carga horária, falta tempo para uma boa consolidação do assunto. Por exemplo, calor e trabalho foram diferenciados da energia interna enquanto formas de energia, porém, os alunos não conseguiram avançar mais e compreendê-los como processos. Cremos que os estu-

dantes poderiam alcançar resultados melhores com tempo para examinar mais detalhadamente as relações conceituais ensinadas.

Enfim, iniciamos este trabalho com um problema de aprendizagem da termodinâmica. Até o momento pudemos mostrar que o ensino pode contribuir para sua solução. Acreditamos que com a continuação das investigações, o problema de aprendizagem da termodinâmica nos cursos dos profissionais da química da UFBA será visto com maior clareza e então, se poderá propor e experimentar soluções que satisfaçam a alunos e professores.

REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

- AUSUBEL, David P., NOVAK, Joseph D., HANESIAN, Helen. *Psicologia Educacional*. Tradução por Eva Nick et al. Rio de Janeiro : Interamericana, 1980.
- AVALIAÇÃO DA DISCIPLINA QUI013 FÍSICO-QUÍMICA I. Salvador : Depto. de Físico-Química da UFBA, 1988. Não publicado.
- BARENHOLTZ, H., TAMIR, P. A comprehensive use of concept mapping in design instruction and assessment. *Research in Science & Technological Education*, v.10(1), p. 37-52, 1992.
- BARROW, Gordon M. *Physical Chemistry*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 1979.
- _____. Thermodynamics should be built on energy — not on heat and work. *Journal of Chemical Education*, v.65(2), p. 122-125, 1988.
- CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an introduction to thermostatics*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1985.
- CASTANHO, Maria Eugênia L. M. Da discussão e do debate nasce a rebeldia. In: VEIGA, I. P. A. *Técnicas de ensino: por que não?* Campinas, SP : Papirus, 1993.
- CASTELLAN, Gilbert. *Físico-Química*. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1972. v1.
- COLL, C., GALLART, I. S. I. La importancia de los contenidos en la enseñanza. *Investigación en la escuela*, v.3, p. 19-27, 1987.
- DENBIGH, Kenneth. *The principles of chemical equilibrium*. 4th ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1981.
- DRIVER, Rosalind, GUESNE, Edith, TIBERGHIE, Andrée. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. 2^a ed. Madrid : Morata/MEC, 1992.
- DUIT, Renders. Should energy be illustrated as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, v.9(2), p.139-145, 1987.
- _____. Understanding energy as a conserved quantity - remarks on the article of R. U. Selx. *European Journal of Science Education*, v.3(3), p. 291-301, 1982.
- ELLSE, Mark. Transferring not transforming energy. *School Science Review*, v.69, p. 427-437, 1988.
- FELTRE, Ricardo. *Química*. 4^a ed. São Paulo : Moderna, 1994. v.2.
- FONSECA, Martha Reis Marques. *Química*. São Paulo : FTD, 1992. v.2.
- FRANK, David V. BAKER, Claire A., HERRON, J. Dudley. Should students always use algorithms to solve problems? *Journal of Chemical Education*, v.64(6), p.514-515, 1987.

- FURIÓ MÁ, Carles J. Las concepciones alternativas del alumnado en ciencias: dos décadas de investigación. Resultados y tendencias. *Alambique*, v.7, p. 12, 1996.
- GANGOSO, Zulma. El fracaso en los cursos de física. El mapa conceptual, una alternativa para el análisis. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.14 (1), p.17-36, 1997.
- GARCIA HOURCADE, J. L., RODRIGUEZ DE AVILA, C. Preconcepciones sobre el calor en 2o de B.U.P. *Enseñanza de las Ciencias*, v.3, p.188-193, 1985.
- GIL-PÉREZ, Daniel. Tres paradigmas basicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, v.1(1), p. 26-33, 1983.
- GONZÁLEZ GARCÍA, F. M. Los mapas conceptuales de J. D. Novak como instrumentos para la investigación en didáctica de las ciencias experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, v.10(2), p.197-212, 1992.
- GOWIN, D. Bob. *Educating*. Ithaca, NY : Cornell University Press, 1981.
- HAASE, R. Survey of fundamental laws. In: EYRING, Henry, HENDERSON, Douglas, JOST, Wilhelm. *Physical chemistry: an advanced treatise*. New York : Academic Press, 1971. v.1.
- HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, MERRILL, John. Fundamentos de física. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos. 1991. v.2.
- HERRON, J. Dudley, GREENBOWE, Thomas J. What can we do about Sue: a case study of competence. *Journal of Chemical Education*, v.63(6), p. 528-531, 1986.
- HIERREZUELO, José, MONTERO, Antonio. *La ciencia de los alumnos*. Barcelona : Laia/MEC, 1989.
- JIMÉNEZ GOMEZ, E. et al. Problemas de terminología en estudios realizados acerca de "lo que el alumno sabe" sobre ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, v.12 (2), p. 236, 1994.
- JONES, Hugh G. Thermodynamics — a practical subject. *Physics Education*, v.19(1), p. 15-18, 1984.
- KEMP, H. R. The concept of energy without heat or work. *Physics Education*, v.19(5), p. 234-240, 1984.
- LANGEVIN, Paul. O valor educativo da história das ciências. *Revue de Synthèse*, tomo VI, n.1, avr.1933. Tradução não publicada.
- LEHRMAN, Robert L. Energy is not the ability to do work. *The Physics Teacher*, v.11(1), p. 15-18, 1973.
- LEMBO, Antônio, MOISÉS, Hélvio, SANTOS, Thaís. *Ciências: o corpo humano*. São Paulo : Moderna, 1992.

- LEWIS, Gilbert Newton, RANDALL, Merle. *Thermodynamics*. 2nd ed. Revised by Kenneth S. Pitzer and Leo Brewer. New York : McGraw-Hill, 1961.
- LINDSAY, R. Bruce. *Energy: historical development of the concept*. Stroudsburg : Dowden, Hutchinson & Ross, [1977?].
- LOPES, Antonia Osima. Aula expositiva: superando o tradicional. In: VEIGA, I. P. A. *Técnicas de ensino: por que não?* Campinas, SP : Papirus, 1993.
- LYTHCOTT, Jean. Problem Solving and requisite knowledge in chemistry. *Journal of Chemical Education*, 67, p.248-252, 1990.
- MARKHAM, K. M., MINTZES, J. J., JONES, M. G. The concept map as a research and evaluation tool: further evidence of validity. *Journal of Research and Science Teaching*, v.31(1), p. 91-101, 1994.
- MÁXIMO, Antônio, ALVARENGA, Beatriz. *Física*. São Paulo : Scipione, 1997.
- MAYER, Julius Robert. On the forces of inorganic nature. In: LINDSAY, Robert Bruce (ed.). *Energy: historical development of the concept*. Stroudsburg : Dowden, Hutchinson & Ross, [1975?].
- McGLASHAN, M. L. The use and misuse of the laws of thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, v.43(5), p. 226-232, 1966.
- MICHINEL MACHADO, J. L., D'ALESSANDRO MARTÍNEZ, A. El concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, v.12(3), p. 369-380, 1994.
- MOREIRA, Marco Antonio. *Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física*. Porto alegre : EDUFRGS, 1983.
- _____. *Pesquisa em ensino: o vé de Gowin*. São Paulo : EPU, 1990.
- _____. *Mapas conceituais no ensino da física*. Porto Alegre : Instituto de Física da UFRGS, 1992.
- _____. Aprendizaje significativo, conocimiento científico y cambio conceptual. Conferência apresentada no *Seminário sobre "Aspectos relevantes en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias y la matemática"*. Madrid, 1992.
- _____. Cambio conceptual: critica a modelos actuales y una propuesta a la luz de la teoria del aprendizaje significativo. *Conferencia internacional "Science and mathematics education for the 21st century: towards innovatoty approachs"*. Concepción, Chile, 1994.
- MOREIRA, Marco Antonio, BUCHWEITZ, Bernardo. *Mapas conceituais*. São Paulo : Moraes, 1987.
- MORSE, Philip M. *Thermal Physics*. 2nd ed. Reading, MA : Benjamin/Cummings, 1978.

NOVAK, Joseph D. *Uma teoria de educação*. Tradução por Marco Antonio Moreira. São Paulo : Pioneira, 1981.

_____. Application of advances in learning theory and philosophy of science to the improvement of chemical teaching. *Journal of Chemical Education*, v.61(7), p. 607-612, 1984.

_____. Constructivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las Ciencias*, v.6(3), p.213-223, 1988.

_____. Concept mapping: a useful tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, v.27(10), p.937-949, 1990.

_____. Ayudar los alumnos a aprender como aprender. *Enseñanza de las Ciencias*, v.9(3), p. 215-228, 1991.

NOVAK, Joseph D., GOWIN, David B. *Learnig how to learn*. Cambridge : Cambridge University Press, 1984.

NUSSENZVEIG, H. Moisés. *Curso de física básica*. São Paulo : Edgad Blücher, 1981. v.2.

OBERT, Edward F. *Concepts of thermodynamics*. New York : McGraw-Hill, 1960.

OTERO, J. C. Assimilation problems in traditional representations of scientific knowledge. *European Journal of Science Education*, v.7(4), p.361-370, 1985.

PERUZZO, Tito Miraglia, CANTO, Eduardo Leite. *Química: na abordagem do cotidiano*. São Paulo : Moderna, 1996.

PILLA. Luíz. *Físico-Química*. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e científicos, 1979. v.1

PICKERING, Miles. Further studies on concept learning versus problem solving. *Journal of Chemical Education*, 67, p.254-255, 1990.

POSNER, George J. et al. Accommodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change. *Science Education*, v.66(2), p. 211-227, 1982.

PREGNOLATTO, Yukimi. *A eletrostática: o conhecimento possível e o conhecimento aprendido*. Tese de doutoramento. São Paulo : FEUSP, 1994.

PRO BUENO, Antonio. El análisis de las actividades de enseñanza como fundamento para los programas de formación de profesores. *Alambique*, v.15, p. 15-28, 1998.

PROJETO DE AVALIAÇÃO DA DISCIPLINA QUI013 FÍSICO-QUÍMICA I. Salvador : Depto. de Físico-Química da UFBA, [1988?]. Não publicado.

RESNICK, Lauren B. Mathematics and science learning: a new conception. *Science*, v.220, p.477-478, 1983.

- RESNICK, Robert, HALLIDAY, David. Física. 4a ed. Rio de Janeiro : LTC, 1984.
- ROSE, J. W. Thermodynamics — a direct approach. In: LEWINS, Jeffrey D. *Teaching Thermodynamics*. Plenum : New York,
- ROTH, Wolff-Michael, ROYCHODHURY, Anita. Science discourse through collaborative concept mapping: new perspectives for the teacher. *International Journal in Science Education*, v.16 (4), p. 437-455, 1994.
- SCHENBERG, Mário. *Pensando a física*. 4a ed. São Paulo : Nova Stella, 1990.
- SCHIMID, G. Bruno. Energy and its carriers. *Physics Education*, v.17, p. 212-218, 1982.
- SEVILLA SEGURA, C. Reflexiones en torno al concepto de energía. Implicaciones curriculares. *Enseñanza de las Ciencias*, v.4(3), p. 247-252, 1986.
- SEXL, Roman U. Some observations concerning the teaching of the energy concept. *European Journal of Science Education*, v.3(3), p. 285-289, 1982.
- SILVA JR., César da, SASSON, Sezar, SANCHES , Paulo Sérgio Bedaque. *Ciências: entendendo a natureza*. 3ª ed. São Paulo : Saraiva, 1993.
- SILVA, José Luis P. B. Emprego de modelos no ensino da físico-química. *Anais do 3º Encontro de Química do Nordeste*. Salvador : SBQ/UFBA/UNEB, 1987.
- _____. Roteiro para estudo da termodinâmica de sistemas unicomponentes. *Anais do 4º Encontro de Química do Nordeste*. Aracaju : SBQ/UFS, 1989.
- _____. Variações isotérmicas das funções termodinâmicas de fases condensadas. *5º Encontro Nacional de Ensino de Química*. Porto Alegre - RS, 1990. Livro de resumos.
- _____. Emprego de modelos no ensino da físico-química. II . *5º Encontro Nacional de Ensino de Química*. Porto Alegre - RS, 1990. Livro de resumos.
- _____. Construindo a primeira lei da termodinâmica. *1º Encontro Norte-Nordeste de Ensino de Química*. Recife, 1991.
- _____. Mapeamento conceitual e ensino da termodinâmica. *7º Encontro Nacional de Ensino de Química*. Belo Horizonte-MG, 1994.
- _____. Estrutura cognitiva e resolução de problemas. *Anais da 18ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. [São Paulo] : SBQ, 1995.
- _____. Energia. *Anais do 8º Encontro Nacional de Ensino de Química*. Campo Grande-MS : UFMS, 1996.
- _____. Interações, paredes e sistemas termodinâmicos. *Atas do 12º Simpósio Nacional de Ensino de Física*. Belo Horizonte : UFMG/CECIMIG/FAE, 1997.

- SILVA, José Luis P. B., RESINES, Jose A., DE LA FUENTE, Maria Tereza. La diferenciación entre materia y energía en la enseñanza secundaria. *Anales del 2º Simposio sobre La Docencia de las Ciencias Experimentales en la Enseñanza Secundaria*. Madrid : Colegio Oficial de Biólogos, 1998.
- SAWREY, Barbara A. Concept learning versus problem solving. *Journal of Chemical Education*, 67, p.253-254, 1990.
- TARSITANI, Carlo, VICENTINI, Matilde. Mental representations of thermodynamics. *Science and Education*, v.5, p. 51-68, 1996.
- TRUMPER, Ricardo. A survey of conceptions of energy of Israeli preservice high school biology teachers. *International Journal of Science Education*, v.19(1), p. 31-46, 1997.
- VILLANI, Alberto. Mudança conceitual no ensino de física: objetivo ou utopia? *Atas do 3º Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Porto Alegre : Instituto de Física da UFRGS, 1990.
- WANDERSEE, J. H. Concept mapping and the cartography of cognition. *Journal of Research and Science Teaching*, v.27(10), p. 923-936, 1990.
- WANDERSEE, J. H. The historicity of cognition: implications for science education research. *Journal of Research in Science Teaching*, v.29(4), p.423-434, 1992.
- WARREN, J. W. The teaching the concept of heat. *Physics Education*, v.7, p. 41-44, 1972.
- _____. The nature of energy. *European Journal of Science Education*, v.4(3), p. 295-297, 1982.
- WATTS. D. Michael. Some alternatives views of energy. *Physics Education*, v.18, p. 213-217, 1983.
- WILLSON, M., WILLIAMS, D. Trainee teacher's misunderstanding in chemistry: diagnosis and evaluation using concept mapping. *Secondary Science Review*, v.77(280), p. 107-113, 1996.
- ZEMANSKY, Mark W. The use and misuse of the word "heat" in physics teaching. *The Physics Teacher*, sept 1970, 295-300.

Apêndice 1

NOTAS SOBRE

TERMODINÂMICA BÁSICA

JOSÉ LUIS P. B. SILVA

**NOTAS SOBRE
TERMODINÂMICA BÁSICA**

INSTITUTO DE QUÍMICA DA UFBA

SALVADOR

1998

APRESENTAÇÃO

Estas notas têm dois objetivos: o primeiro é fornecer aos alunos da disciplina QUI013 Físico-Química I um guia para o acompanhamento do curso durante sua primeira metade; o segundo é apresentar algumas discussões sobre conceitos termodinâmicos que não são encontradas nos livros-textos de físico-química que conhecemos.

A seqüência do curso foi planejada durante nossas investigações sobre o ensino da termodinâmica e pretende facilitar a aprendizagem do assunto pelos alunos.

As discussões sobre os conceitos termodinâmicos têm por finalidade complementar a matéria apresentada nos livros-textos recomendados para a disciplina. Buscamos, com isso, tornar mais clara a estrutura conceitual da termodinâmica e facilitar sua aprendizagem pelos alunos.

A publicação destas notas se justifica pela ajuda na compreensão da termodinâmica que já prestaram em outras oportunidades, conforme nos foi informado por ex-alunos da disciplina. Esperamos que sirvam de auxílio para os alunos que a utilizarem desta vez.

O texto não é um produto acabado. Necessita de muita elaboração, ainda. Por isso, toda crítica é bem vinda, pelo que agradecemos antecipadamente.

Salvador, outubro/98

José Luis Silva

ENERGIA NO COTIDIANO

Energia é um termo amplamente utilizado na descrição e na explicação de fatos cotidianos e, por isso, bastante familiar. Devido aos diferentes fenômenos a que se encontra associada, a energia exibe grande número de significados, por exemplo: ação, trabalho, força, atividade, vitalidade, eletricidade, calor, etc..

A energia é um assunto importante na sociedade moderna. Notícias sobre construção de hidrelétricas, descoberta e esgotamento de jazidas de petróleo, fontes alternativas de energia, são freqüentes nos meios de comunicação. Nessas notícias, a energia é o tema central, como alguma coisa que se produz e se consome.

As principais fontes de energia em uso, são: os movimentos das águas dos rios e do ar, a luz solar, o calor emitido pelo sol e pelo interior do planeta, e a matéria. Através de dispositivos adequados converte-se movimento, luz ou calor, em energia elétrica, que é transportada para os locais de consumo, onde é convertida na(s) forma(s) desejada(s). A matéria é usada na armazenagem e no transporte da energia. Para dispor da energia contida na matéria é necessário transformá-la: pode-se obter eletricidade, diretamente, via reações eletroquímicas; ou calor, através de reações químicas ou nucleares, que é utilizado na produção de movimento, a ser convertido em eletricidade.

À primeira vista, a energia elétrica parece ser a forma de energia de maior emprego. De fato, os equipamentos contemporâneos são fabricados de modo a empregar a eletricidade como fonte de energia. Deve-se notar, porém, que a eletricidade é uma forma intermediária de energia, um meio de transportar a energia das grandes usinas ao consumidor. Muitas vezes, as formas de energia de interesse final, nas quais a energia elétrica é convertida, são: movimento, luz, calor ou som.

Nossa civilização atual exibe um consumo de energia muito alto. A produção de energia tem criado problemas de ordem ambiental — poluição do ar por resíduos da queima de combustíveis, desastres em usinas nucleares, entre outros — que ameaçam a sobrevivência da espécie humana e de outras espécies. A manutenção do nosso atual modo de vida requer racionalização do consumo, com eliminação dos excessos, e aumento da eficiência dos processos de conversão, seja pelo aperfeiçoamento dos correntes processos de geração de energia ou pela criação de novos processos.

Em suma, a experiência cotidiana revela que a energia é indispensável à vida e ao atual modo de viver; manifesta-se de diversas formas; é consumível, produtivo, transportável e armazenável.

CONCEITO CIENTÍFICO DE ENERGIA

Conceitos científicos não são necessariamente iguais aos cotidianos. Os conhecimentos científicos são construções teóricas que possuem evidências experimentais diretas ou indiretas. O caráter experimental das ciências possibilita a reprodução dos fatos e seu estudo por todos os membros das comunidades científicas.

O conjunto dos conhecimentos compartilhados pelos praticantes de uma ciência constitui sua estrutura conceitual. A estrutura conceitual de qualquer ciência desenvolve-se ao longo do tempo, modificando-se à medida que novos fatos solicitam novas formulações explicativas. Desse modo, novos conceitos são criados, outros são aprimorados, alguns são descartados.

Um princípio científico é um conceito (ou estrutura conceitual) que dá origem a uma nova área de estudo. É um conceito primitivo, do qual derivam outros conceitos da teoria. O conceito científico da energia é uma construção teórica e ex-

perimental original, que não pode ser deduzida de outros conceitos. A conceituação da energia constitui-se no primeiro princípio ou primeira lei da termodinâmica.

A termodinâmica se estabeleceu como ciência na segunda metade do século XIX com a consolidação dos conceitos de conservação da energia e do crescimento da entropia, conceitos novos na física da época. A nova teoria possibilitou interpretar fenômenos de áreas diversas, como: mecânica, eletricidade, magnetismo, química, de modo integrado, abrindo perspectivas para o desenvolvimento científico e tecnológico que viria a se concretizar nos processos de produção de energia e novos materiais das décadas seguintes.

O objeto de estudo da termodinâmica é a conversão da energia, em suas diversas formas. O estudo termodinâmico abrange a predição da possibilidade de ocorrência dos processos de conversão da energia, dos estados de equilíbrio desses processos e das quantidades das diferentes formas de energia envolvidas.

Em termodinâmica, a energia é o conceito central. A energia é uma propriedade da natureza que se conserva e se manifesta de diversas formas interconvertíveis. O suporte experimental de tal afirmação, consiste na verificação de que nos processos de conversão da energia, a relação quantitativa entre a forma de energia produzida e a forma de energia consumida é constante, ou seja: existe uma correspondência quantitativa entre as formas de energia envolvidas no processo de conversão. A título de exemplo, tome-se os dados experimentais da tabela abaixo, que mostram a proporcionalidade existente entre a elevação de temperatura numa massa d'água e o quadrado da corrente elétrica que a produziu. Estes resultados foram obtidos por James Joule e comunicados na

sua primeira publicação sobre a conservação da energia em 1843 ^[140]:

Exp. nº	2	3	4	5	6
ΔT (°F)	1,56	0,36	2,11	0,10	0,21
i (*)	0,902	0,418	1,019	0,236	0,340
$\Delta T / i^2$	1,91	2,06	2,03	1,80	1,82

(*) as unidades de corrente não foram especificadas no trabalho. Porém, o fato das medidas terem sido feitas com o mesmo galvanômetro torna-as comparáveis entre si. O tempo de passagem da corrente foi fixado em quinze minutos. A massa d'água foi mantida igual e constante durante as experiências.

Estes resultados mostram que, à passagem da corrente elétrica corresponde um aquecimento, entendido por Joule como resultante da produção de calor. Embora os dados não sejam muito precisos (a experiência foi posteriormente aprimorada) é possível estabelecer a relação quantitativa entre a variação de temperatura da água e a corrente elétrica: $\Delta T / i^2 = 1,92$, em média. Esta expressão permite prever o aquecimento produzido por quaisquer outros valores de corrente, ou a corrente necessária para a elevação de temperatura desejada, mantidos constantes o tempo de passagem da corrente e a massa d'água.

A interpretação teórica dada a esta correspondência entre eletricidade e calor, é que as duas formas de energia envolvidas na experiência são equivalentes, ou seja: a energia elétrica converteu-se integralmente em calor. Outras formas de energia foram também relacionadas quantitativamente, através de experiências adequadas, conduzindo à generalização da idéia de equivalência das formas de energia nos processos de conversão. Concluiu-se que, embora as formas pelas quais a

^[140] JOULE, James P.. On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat. In: LINDSAY, Robert Bruce (ed.). *Energy: historical development of the concept*. Stroudsburg : Dowden, Hutchinson & Ross, [1975?]. p. 308-344.

energia se manifesta não se conservem, já que uma é consumida quando a outra é produzida, a quantidade total de energia do universo é considerada constante.

Em síntese: a conceituação científica da energia se dá pela enunciação de seus atributos, a conservação e a multiformidade. A interconversão quantitativa das formas de energia, evidenciada experimentalmente, justifica a conservação do todo.

Por fim, note-se que o conceito científico e o conceito cotidiano da energia, como expostos, são perfeitamente conciliáveis. A energia é indispensável à vida e ao nosso atual modo de viver; manifesta-se de diversas formas; é armazenável e pode ser transferida de um lugar a outro. A aparente contradição entre conservação, produção e consumo é resolvida admitindo-se que produção e consumo são duas facetas do mesmo processo: a conversão de uma forma de energia em outra.

A formulação do conceito científico de energia não se deu de modo fácil, como se a primeira lei estivesse pronta e acabada à espera de um descobridor. O estudo histórico do tema revela um processo trabalhoso, tanto do ponto de vista teórico quanto experimental.

ORIGENS DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

A termodinâmica tem como objetivo o estudo da conversão das diversas formas de energia. Entretanto, o que atualmente se conhece como formas de energia eram coisas separadas ou pouco relacionadas até o final do século XVIII, bem como as relações existentes entre as formas de energia conhecidas não eram compreendidas como processos de conversão.

Energia cinética (conhecida como força viva) e energia potencial (força morta) eram conceitos restritos à mecânica. O

conceito de trabalho, com sua formulação matemática, não era plenamente aceito, ainda.

Relações qualitativas entre calor e trabalho mecânico eram conhecidas há um século, porém, coexistiam em disputa, duas teorias sobre o calor: uma, que explicava o calor como efeito de um fluido, o calórico, e outra, que o entendia como movimento das moléculas constituintes dos corpos.

Movimentos de fricção produziam eletricidade nos geradores eletrostáticos e a atração e a repulsão elétricas podiam gerar movimento. As relações entre magnetismo e eletricidade eram desconhecidas.

Reações químicas podiam produzir calor e luz. Por outro lado, reações químicas haviam sido produzidas por centelhas.

A luz era objeto de estudo da ótica, onde ocorria a disputa entre as teorias corpuscular e ondulatória.

A conceituação da energia como propriedade conservativa viria a ser um movimento no sentido da unificação dessas áreas de estudo.

Segundo Kuhn ^[141], foram três os principais fatores a contribuir para a formulação do conceito de conservação da energia: a maior “disponibilidade dos processos de conversão” da energia resultante da invenção da bateria elétrica, por Volta, em 1800; o interesse pela construção de máquinas, que conduziu à quantificação do trabalho mecânico realizado; e a idéia filosófica da existência de “um princípio unificador único para todos os fenômenos naturais”.

De fato, a bateria, como fonte de energia elétrica de fácil acesso — fácil de construir, transportável, renovável — possibilitou a realização de experiências re-

[141] KUHN, Thomas. A conservação da energia como exemplo de descoberta simultânea. In: KUHN, Thomas. *A tensão essencial*. Lisboa: Edições 70, 1989. p. 101-141.

produtíveis que mostravam a existência de conexões até então desconhecidas ou obscuras. Se a energia elétrica era produzida por reações químicas, o inverso também podia ser feito. Correntes elétricas geravam forças magnéticas e vice-versa. A eletricidade fazia com que corpos fossem aquecidos e calor podia produzir eletricidade quando aplicado a uma junção de dois metais diferentes (termopar).

Verdadeiras cadeias de processos de conversão tornavam-se evidentes. Por exemplo: as reações químicas na bateria produziam uma corrente elétrica com conseqüentes forças magnéticas, que podiam ser utilizadas na produção de movimento de fricção, gerando eletricidade, usada para fazer as reações químicas da bateria ocorrer em sentido contrário, recarregando-a. Ou então, calor era convertido em movimento utilizado na geração de eletricidade, que produzia calor.

Um segundo fator decisivo na formulação da conservação da energia foi a quantificação do trabalho mecânico como o produto da força aplicada sobre um corpo pelo deslocamento causado nesse corpo. Isso abriu caminho para a quantificação de outras formas de energia em termos do trabalho mecânico, o que podia ser realizado experimentalmente através dos processos de conversão.

O estabelecimento de relações quantitativas entre grandezas diversas contribuiu, decisivamente, para o desenvolvimento das idéias de conversão e multiformidade do que era denominado “força” ou “poder” e veio a ser a energia. Daí para o conceito de conservação da energia foi necessário o passo teórico final.

De acordo com Lindsay, a noção de que “algo se conserva em meio às mudanças” é muito antiga, sendo encontrada já no ano 60 da era cristã, com Hero de Alexandria. Ao final do século XVIII, existiam idéias de conservação da quantidade de movimento, da energia cinética (então de-

nominada força viva), da massa das substâncias em reações químicas, do calórico (substância causadora da sensação de calor) [¹⁴²].

Ainda segundo Kuhn, as idéias filosóficas de igualdade entre causa e efeito ou da impossibilidade do movimento perpétuo aplicadas aos processos de conversão, conduziram à conservação da energia. De fato, se cada forma de energia é causa para o surgimento de uma outra, tomada como efeito, a igualdade entre causa e efeito exige que a conversão seja quantitativa. Por outro lado, se em uma cadeia de processos de conversão a energia pudesse ser criada, o excesso produzido seria convertido em movimento, que se tornaria perpétuo pela contínua criação da forma de energia considerada. Conclui-se, então, pela impossibilidade de criação da energia. Mas, se não pode haver criação de energia, também não pode haver destruição, por que a inversão do processo de destruição produziria energia, o que é impossível. Logo, a conversão deve ser quantitativa e a energia deve ser conservada.

Em outras palavras, a constatação experimental de relações quantitativas constantes entre energia cinética e calor, eletricidade e calor, energia cinética e energia potencial gravitacional, “energia química” e eletricidade, “energia química” e calor, etc., demonstrou a correspondência existente entre estes fenômenos, entendidos como causa e efeito. A equivalência entre causa e efeito, entretanto, só pode ser entendida admitindo-se ambos como aspectos distintos de algo indestrutível, uma realidade que se conserva à medida que se transforma: a energia. Assim foram gerados os conceitos de formas de energia e de conversão de energia, que dão

[¹⁴²] LINDSAY, Robert Bruce. The concept of energy and its early historical development. In: LINDSAY, Op. Cit., p. 13-23.

sustentação à idéia de conservação da energia.

Enfim, deve ser enfatizado que o princípio da conservação da energia ou primeiro princípio da termodinâmica é uma construção tanto teórica, quanto experimental. Seus formuladores avançaram na produção do conhecimento, saltando do plano especulativo ou das observações empíricas, para a conceituação científica, ao integrar teoria e prática.

ENERGIA INTERNA

A idéia de conservação da energia implica no conceito de energia interna. De fato, entende-se a energia interna do universo como toda a energia existente, cuja quantidade é inalterável. Da constatação que o universo possui energia conclui-se que suas partes constituintes possuem suas próprias quantidades de energia interna. De modo geral, pode-se definir a energia interna como a energia possuída por um sistema em virtude de sua existência material. (Do ponto de vista microscópico, a energia interna é entendida como a soma das energias das moléculas constituintes do sistema com a energia de interação molecular.)

A quantidade de energia interna de qualquer sistema, embora não possua valor conhecido, varia quando o sistema é submetido a transformações e essas variações podem ser calculadas conhecendo-se a equação apropriada. As mudanças no universo ocorrem com transferência de energia entre sistemas.

A energia interna é a forma como a energia encontra-se armazenada nos sistemas, portanto, a forma permanente de energia. Na maioria das vezes, as transferências de energia ocorrem com a mediação de formas de energia de existência transitória. Por exemplo: ao se ligar uma lanterna a eletricidade é convertida em luz

que se transforma em energia interna dos sistemas que são iluminados. O processo todo pode ser descrito como a transferência da energia interna da mistura de substâncias contida na bateria para o restante do universo, ou seja: aquilo que não está no interior da bateria. Durante o processo ocorreram formas de energia transitórias, eletricidade e luz, que foram convertidas em energia interna de outros sistemas situados nas vizinhanças da bateria.

UNIVERSO, SISTEMA E VIZINHANÇA

Neste ponto da discussão convém esclarecer os significados de três dos termos empregados nos parágrafos anteriores: universo, sistema e vizinhança. O universo é composto de tudo que existe. Cada parte do universo que é delimitada, concreta ou imaginariamente, para fins de estudo, é um sistema. Ao delimitar-se qualquer sistema, procede-se a divisão do universo em dois: o sistema e o resto do universo, denominado de vizinhança do sistema. Se, por exemplo, o foco de atenção for a energia interna da bateria, a bateria será caracterizada como sistema e o restante, como vizinhança. Melhor, ainda: o sistema será a mistura de substâncias no interior da bateria, pois a energia interna do invólucro não é convertida em eletricidade. Em sentido amplo, para efeito do emprego da termodinâmica na resolução de problemas, o universo é composto de duas partes: o sistema e a vizinhança.

Os sistemas devem ser bem caracterizados, pois interessam as modificações que ali ocorrem. Contudo, essas modificações ocorrem por interação sistema-vizinhança e o estudo do sistema requer conhecimentos sobre a vizinhança, também.

As interações sistema/vizinhança ocorrem através da superfície que os separa, denominada fronteira. As característi-

cas da fronteira são determinadas pelo equipamento que contem o sistema. Em geral, diz-se que a fronteira é do sistema e, portanto, as características da fronteira são atribuídas ao sistema. Por exemplo: se um sistema fluido está contido em um botijão rígido, pode-se pensar o sistema como rígido no que toca à interação com a vizinhança. As características da fronteira determinam os modos como sistema e vizinhança interagem, trocando energia, bem como as possibilidades de controle dos processos de transferência de energia.

Em termodinâmica consideram-se três modos de transferir energia: (a) por adição ou retirada de substância do sistema, quando se diz haver transferência de massa; (b) por calor; (c) por trabalho.

TRANSFERÊNCIA DE MASSA

A matéria contém energia. Logo, se substâncias são adicionadas ou retiradas de um sistema, sua energia interna varia. Este modo de transferir energia entre sistema e vizinhança é denominado transferência de massa.

A energia interna contida em uma unidade de massa de uma substância qualquer é a sua energia interna específica. Deve-se esperar que substâncias diferentes possuam energias internas específicas diferentes, porque as moléculas que constituem as substâncias são distintas e, por isso, as energias moleculares e as interações moleculares não são iguais.

A quantidade de energia transferida por massa pode ser calculada somando-se os produtos das energias internas específicas das diversas substâncias pelas respectivas variações de massa.

A transferência de massa ocorre apenas entre sistemas abertos. Quando a fronteira é fechada a energia só pode ser transferida entre sistema e vizinhança de dois outros modos: calor e trabalho.

CALOR

Até a aceitação da lei da conservação da energia coexistiam duas teorias sobre a natureza do calor: a teoria do calórico e a teoria do calor como movimento. Os adeptos de ambos buscavam a hegemonia de suas idéias através das explicações dos fatos experimentais. ao final prevaleceu a posição da teoria mecanicista, porém, a teoria do calórico deixou rastros na terminologia empregada atualmente em termodinâmica, bem como na conceituação de calor empregada no dia-a-dia. Seu conhecimento pode explicar várias das confusões conceituais que costumam ocorrer sobre o calor.

O calórico consistia de uma substância material fluida, extremamente rarefeita, capaz de penetrar ou escapar de todo e qualquer lugar do espaço. O calórico era fortemente atraído pela matéria e era auto-repulsivo. Por ser substância, o calórico se conservava. A medida da intensidade de calórico de um sistema (proporcional à quantidade de calórico por unidade de volume) era a temperatura.

O conceito de calórico associado a um modelo corpuscular da matéria em que as partículas eram atraídas por gravitação explicava vários fenômenos, como: as variações de volume dos corpos quando aquecidos e resfriados, as mudanças de estados de agregação, a transferência de energia causada por diferença de temperaturas, a variação do calor específico com a temperatura, entre outros [143].

Termos atualmente empregados, como: transferência de calor, condução de calor, absorção e liberação de calor, provêm da época em que o calor era considerado uma substância que penetrava os corpos e, portanto, podia ser transferida, conduzida, absorvida, liberada. Por outro lado, as idéias de capacidade calorífica e

[143] BROWN, S. C. The caloric theory of heat. *American Journal of Physics*, v.18, p. 367-373, 1950.

calor específico estavam vinculadas às capacidades de contenção do calórico pelos sistemas. Outros termos ainda, como caloria, calor sensível, calor latente, também têm vínculos com a teoria do calórico.

Os defensores da teoria mecanicista explicavam o calor como movimento das partículas constituintes da matéria. Embora em oposição à teoria do calor como substância durante muito tempo, só adquiriram força suficiente no meio científico para ganhar a disputa com os resultados das experiências de conversão de energia, notadamente os trabalhos de James Joule iniciados na década de quarenta do século passado. A notoriedade de Joule se deve à sua competência em produzir experiências para estabelecer a correspondência quantitativa entre calor e outras formas de energia, evidenciando assim, a conservação da energia.

A derrocada da teoria do calórico se deu, não pela força dos resultados experimentais, mas, por uma escolha teórica: se o calor pode ser considerado uma forma de energia — e energia não é substância — então, calor também não pode ser substância. Em 1950 Clausius publicou um artigo intitulado “Sobre o poder motriz do calor e sobre as leis que podem ser deduzidas do mesmo para a teoria do calor”, onde afirmava:

“As cuidadosas investigações de Joule, nas quais calor é produzido de vários modos diferentes pelo emprego de trabalho mecânico, provaram quase certamente, não somente a possibilidade de aumentar a quantidade de calor em quaisquer circunstâncias, mas também, a lei de que a quantidade de calor desenvolvida é proporcional ao trabalho gasto na operação. Deve-se adicionar a isto outros fatos tornados conhecidos mais tarde que apoiam a visão que

calor não é uma substância, mas consiste em movimento das mínimas partes dos corpos” [144].

Em 1867 o mesmo Clausius estabelecia os “princípios fundamentais da teoria mecânica do calor (...): 1. A energia do universo é constante. 2. A entropia do universo tende a um máximo” [145]. A aceitação destes princípios pela comunidade científica, hoje conhecidos como primeiro e segundo princípios da termodinâmica, conduziu ao abandono da teoria do calórico [146].

Calor passou, então, a ser interpretado como movimento molecular. Mas movimento é energia cinética, logo, não pode ser calor, sob pena de se empregar dois termos diferentes com o mesmo significado. O conceito de calor evoluiu para significar um tipo de processo de transferência de energia. Calor não é mais uma forma de energia. A transferência de energia interna de um corpo a outro pode ocorrer por várias causas; quando a causa é, exclusivamente, uma diferença de temperaturas entre sistema e vizinhança, o processo é denominado calor.

Para uma melhor compreensão dos processos de transferência de energia é preciso lançar mão de modelos corpusculares da matéria. Nesses modelos a energia cinética molecular é uma das parcelas que compõem a energia interna de um sistema. Identificar esta parcela com o calor é retomar a idéia de que o calor está contido

[144] CLAUSIUS, Rudolf. On the motive power of heat, and the laws which can be deduced from it for the theory of heat. In: MENDOZA, E. (ed.) *Reflections on the motive power of fire*. New York : Dover, 1960. p. 108-152.

[145] CLAUSIUS, Rudolf. On different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for application. In: KESTIN, Joseph (ed.). *The second law of thermodynamics*. Stroudsburg : Dowen, Hutchinson & Ross, [1976?] p. 162-193.

[146] Possivelmente devido resquícios da teoria mecânica do calor, ainda hoje há quem entenda a termodinâmica como a parte da física que estuda o calor. Evidentemente essa visão é falsa, pois energia é muito mais que calor.

no sistema, o que é errado, pois um processo não pode ser contido.

O símbolo empregado para simbolizar a quantidade de energia transferida como calor é Q .

TRABALHO

As máquinas térmicas começaram a ser utilizadas como substitutivo do trabalho humano e animal no início do século XVIII. Ao longo dos anos os modelos foram sendo modificados e aperfeiçoados, conduzindo à diversidade e ao aumento da potência, de modo que seu uso se disseminou.

A unidade de medida do efeito mecânico ou “trabalho mecânico” — potência, na conceituação atual — era o cavalo-vapor (horsepower, hp), definida em termos puramente experimentais: a massa que um cavalo podia puxar multiplicada pela velocidade em ritmo de marcha, o que dava um valor de 550 libras.pés/segundo. Desde então, o trabalho mecânico foi conceituado como movimento de massas por ação de forças.

O emprego do termo trabalho juntamente com a adoção de sua quantificação como o produto da força aplicada a um corpo pela distância percorrida pelo corpo sob a ação dessa força veio a ocorrer no período 1818-1839.

O estabelecimento da expressão matemática para o trabalho mecânico foi uma contribuição decisiva para o desenvolvimento do conceito de conservação da energia. Sendo considerado uma forma de energia do mesmo modo que o calor, a eletricidade, etc., passou a servir como referência para a quantificação da energia através dos processos de conversão direta ou indireta de outras formas de energia em movimento ascendente ou descendente de massas. Assim foi obtido o valor do cha-

mado equivalente mecânico do calor. O cálculo do trabalho mecânico era feito multiplicando a força gravitacional pela variação de altura do corpo; a quantidade de calor necessária para produzir esse movimento era calculada pelo produto $m.c.\Delta T$, conhecido da teoria do calórico. Os cálculos produziam resultados diferentes, em unidades diferentes; mas as duas quantidades deveriam ser iguais para haver conservação da energia. O equivalente mecânico do calor é o fator que iguala as duas quantidades, o que hoje se denomina de fator de conversão de unidades.

O conceito de trabalho adotado atualmente é mais amplo que o do trabalho mecânico. Significa um processo de transferência de energia cuja causa não é uma diferença de temperaturas. Ou seja: se a transferência de energia não se dá por transferência de massa ou calor, então, ocorre como trabalho. O trabalho representa vários tipos de transferência de energia, em lugar de uma forma de energia particular. A cada tipo de trabalho corresponde um modo de transferir energia: trabalho mecânico/movimento de massas, trabalho elétrico/ movimento de cargas, luz/movimento de fótons, etc. O trabalho passou a ser caracterizado pelo movimento de outras grandezas físicas, não apenas a massa.

Em se tratando de um processo, o trabalho não pode ser contido em qualquer sistema. A quantidade de energia transferida como trabalho é simbolizada por W .

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

O primeiro princípio ou primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia do universo é constante. Isto significa que o resultado da soma de todas as variações (Δ) de energia interna (U) que ocor-

rem nos i -ésimos sistemas universo deve ser nulo:

$$\sum_i \Delta U(i) = 0. \quad (1)$$

Considerando-se apenas um sistema (s) e a vizinhança (v)

$$\Delta U(s) + \Delta U(v) = 0. \quad (2)$$

Em cada sistema a energia interna pode ser alterada por calor trabalho ou transferência de massa, transferências essas, independentes e não-mutuamente exclusivas. Em termos matemáticos,

$$\Delta U = Q - W + \sum u(k) \Delta m(k), \quad (3)$$

onde os significados dos símbolos são os seguintes:

Q : quantidade de energia transferida como calor, ou simplesmente, calor;

W : quantidade de energia transferida como trabalho, ou simplesmente, trabalho;

$\sum u(k) \Delta m(k)$: quantidade de energia transferida por massa, sendo

u(k) : energia interna específica da “ k -ésima” substância no sistema, e

$\Delta m(k)$: variação da massa da “ k -ésima” substância no sistema.

A equação (3) é uma expressão matemática de origem fenomenológica, pois descreve matematicamente os fenômenos de transferência de energia entre sistema e vizinhança. De acordo com as características das fronteiras dos sistemas pode apresentar formas particulares. Conforme comentado anteriormente (ver UNIVERSO, SISTEMA E VIZINHANÇA) as características das fronteiras são incorporadas aos sistemas, gerando tipos de sistemas. Então, por exemplo, se um sistema é constituído de uma certa quantidade de gás contida em um recipiente de paredes flexíveis, o sistema será considerado como flexível. Se o recipiente é aberto, o sistema é considerado aberto, e assim por diante.

TIPOS DE SISTEMAS SEGUNDO A INTERAÇÃO COM A VIZINHANÇA

Existem três modos de transferir energia entre sistema e vizinhança: calor, trabalho e transferência de massa. Cada um desses modos pode ser evitado ou possibilitado, com o emprego de equipamentos adequados. Os seguintes tipos de sistemas são, então, definidos:

- sistema aberto - possibilita a transferência de massa;
- sistema fechado - impossibilita a transferência de massa;
- sistema diatérmico - possibilita a transferência de energia como calor;
- sistema adiabático - impossibilita a transferência de energia como calor;
- sistema flexível ou elástico - possibilita a transferência de energia como trabalho mecânico de variação de volume;
- sistema rígido - impossibilita a transferência de energia como trabalho mecânico de variação de volume;
- sistema eletricamente não-isolado - possibilita a transferência de energia como trabalho elétrico;
- sistema eletricamente isolado - impossibilita a transferência de energia como trabalho elétrico;

outros tipos de sistemas podem ser descritos conforme os tipos de trabalho que se caracterize.

As situações limites são aquelas em que sistema e vizinhança interagem de todos os modos possíveis ou não interagem. No primeiro caso, não há denominação especial para o tipo de sistema; no segundo caso, o sistema é dito isolado, simplesmente — quando o isolamento é apenas parcial, deve ser especificado: isolamento elétrico, isolamento térmico, etc..

**TIPOS DE SISTEMAS E FORMAS
PARTICULARES DA EXPRESSÃO
DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA**

O caso mais geral é aquele em que nenhum termo do segundo membro da equação (3) é nulo. Do ponto de vista físico, isso significa que pode haver calor, trabalho e transferência de massa. O tipo de sistema que possibilita todas as transferências é o sistema aberto sem qualquer tipo de isolamento, para permitir a realização de todos os possíveis tipos de trabalho. Este sistema é uma idealização, porque sempre há interesse por uma ou outra conversão específica, de modo que o sistema é parcialmente isolado em relação às formas de energia indesejáveis.

Neste estudo nos limitaremos aos sistemas simples, entendidos como “macroscopicamente homogêneos, isotrópicos e sem cargas, suficientemente grandes para que os efeitos de superfície sejam negligenciados, e que não estão sob a ação de campos elétricos, magnéticos ou gravitacionais” [147]. Nesses sistemas, o trabalho realizável reduz-se ao de expansão e compressão devido à variação de volume.

Tomemos um sistema aberto, que sendo, necessariamente, diatérmico e flexível, possibilita a transferência de energia como matéria, calor e trabalho de expansão ou compressão. A correspondente forma particular da equação (3) é:

$$\Delta U = Q - W + \sum u(k) \cdot \Delta m(k). \quad (4)$$

Se o sistema é submetido ao fechamento, permanecendo flexível e diatérmico, fica impossibilitada apenas a transferência de massa — $\Delta m(k) = 0$ —

mas, permanecem as possibilidades de calor e trabalho. A equação (4) reduz-se a

$$\Delta U = Q - W \quad (5)$$

Se, além do fechamento, o sistema é submetido a isolamento térmico (sistema fechado e adiabático, porém flexível), $Q = 0$. Então,

$$\Delta U = -W \quad (6)$$

Porém, um sistema fechado pode ser diatérmico e rígido, caso em que pode haver calor e não pode ocorrer trabalho, pois o volume do sistema é impedido de variar: $\Delta V = 0$. Nesse caso

$$\Delta U = Q \quad (7)$$

Por fim, um sistema pode, simultaneamente, ser fechado, adiabático e rígido. Então, está impedido de trocar energia com a vizinhança tanto por transferência de massa, quanto por calor e trabalho. Logo, sua energia interna é constante, não pode variar: $\Delta U = 0$. O sistema é isolado da vizinhança.

Antes de discutir as expressões próprias para os cálculos das variações de energia interna e das quantidades de calor e trabalho envolvidas nos diversos tipos de processos, é conveniente introduzir, para fins de maior clareza, os conceitos de propriedade, estado, equação de estado e grandeza de interação.

**PROPRIEDADE, ESTADO,
EQUAÇÃO DE ESTADO,
GRANDEZA DE INTERAÇÃO**

Propriedade de um sistema, como o nome indica, é tudo aquilo que lhe é próprio, que pode lhe ser atribuído como posse. Estado de agregação molecular, ener-

[147] CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1985. p. 9.

gia interna, temperatura, quantidade de substância, são exemplos de propriedades.

O conjunto dos valores das propriedades de um sistema define o estado do sistema, ou, inversamente, se o estado do sistema está definido, os valores de todas suas propriedades estão definidas. O estado é uma situação de equilíbrio. Daí, as transformações que ocorrem em um sistema serem entendidas como mudanças de estado, caracterizadas por variações das propriedades do sistema.

Denomina-se equação de estado qualquer relação matemática entre propriedades de um sistema. As equações de estado foram evidenciadas experimentalmente através do estudo das relações entre pressão, volume, temperatura e quantidade de substância de sistemas gasosos. Uma das primeiras, senão a primeira relação PVT obtida foi a equação do gás ideal, $PV = nRT$. Esta relação demonstra que o estado do gás pode ser definido pelo valor de três das propriedades, P, V, T e n: a quarta variável é dependente.

As equações de estado não se restringem ao estado gasoso nem às relações PVT. Por exemplo, a relação entre energia interna, temperatura, volume e quantidade de substância, é uma equação de estado adequada para o cálculo das variações de energia interna. De fato, como a energia interna não é mensurável, sua variação é calculada a partir das variações de propriedades mensuráveis do sistema: temperatura, volume e quantidade de substância.

As equações de estado propiciam os cálculos de variações de propriedades do sistema ocorridas durante os processos, a partir das variações de algumas poucas propriedades mensuráveis. Para efetivação dos cálculos não é necessário o conhecimento dos procedimentos experimentais empregados durante o processo; é suficiente se conhecer os valores das variáveis independentes da equação nos estados inicial e final.

Como as propriedades de qualquer sistema estão relacionadas entre si, todas definidas em cada estado do sistema, são também denominadas funções de estado e variáveis de estado (às vezes, redundantemente, propriedades de estado).

Diferentemente, calor e trabalho não são propriedades, pois seus valores não podem ser atribuídos aos sistemas interagentes, mas apenas aos processos. São grandezas de interação.

Uma mudança de estado é caracterizada pelos estados inicial e final. A descrição de um processo é feita pela mudança de estado e pelo modo como esta é executada. Se um sistema for à mesma mudança de estado por procedimentos experimentais distintos, é de se esperar diferentes quantidades de calor e trabalho em cada processo.

Em vista do exposto nesta seção, fica claro que a equação (4)

$$\Delta U = Q - W + \sum u(k) \cdot \Delta m(k)$$

e suas formas particulares não são equações de estado, pois incluem não somente propriedades, mas também, grandezas de interação. Embora sejam bastante úteis, não permitem calcular a variação de energia interna com base no conhecimento da mudança de estado apenas. As equações de estado serão desenvolvidas mais adiante, após a construção do conceito de processo reversível. Na próxima seção iniciamos a discussão sobre os processos em termodinâmica.

EQUILÍBRIO, DESEQUILÍBRIO E PROCESSO

O equilíbrio termodinâmico é definido pela igualdade dos valores de determinadas propriedades intensivas dos sistemas interagentes cujas diferenças são causas de transferência de energia. Assim,

dois ou mais sistemas encontram-se em equilíbrio térmico, se possuem temperaturas iguais; em equilíbrio mecânico (em relação à variação de volume), se possuem as mesmas pressões; em equilíbrio elétrico, se possuem potenciais elétricos iguais, e assim por diante. Note-se que, por se tratar de propriedades intensivas, as condições de equilíbrio aplicam-se, também, internamente: as partes constitutivas do sistema devem apresentar o mesmo valor da propriedade que define o equilíbrio.

Processos termodinâmicos são transferências de energia. Um processo consiste na interação de, no mínimo, dois sistemas, ou duas partes de um sistema, que se encontram em desequilíbrio. Portanto, além das diferenças dos valores de propriedades intensivas dos sistemas (causas do processo), são necessárias as condições físicas para que ocorram as interações (contato), determinadas pelos tipos de equipamentos que contêm os sistemas. Exemplificando: dois sistemas podem possuir temperaturas diferentes — desequilíbrio térmico, causa para a existência de calor — mas, a transferência de energia só ocorrerá, se as paredes dos recipientes que contêm os sistemas forem diatérmicas. Analogamente, só haverá trabalho de variação de volume se existir uma diferença de pressões entre sistema e vizinhança e se o sistema for flexível.

Por outro lado, as condições para interação podem estar satisfeitas, sem que haja causa para a ocorrência do processo. Por exemplo: um sistema diatérmico e flexível à mesma temperatura e pressão que a vizinhança, não irá trocar energia como calor e trabalho de variação de volume, por não haver causa, embora isso seja possível, pois existe contato adequado.

Concluimos que: causa (desequilíbrio) e contato são condições necessárias para que os processos ocorram, porém, a condição de suficiência é a existência concomitante de ambos.

Durante um processo, as diferenças de propriedades que o originaram são diminuídas (as causas se esgotam) e os sistemas interagentes tendem ao equilíbrio. Logo, há dois modos pelos quais um processo é finalizado: (a) por esgotamento das causas e alcance do equilíbrio, ou (b) por interrupção do contato entre os sistemas. Neste caso, os sistemas permanecem em desequilíbrio, porém, sem condições para interagir.

Os conceitos de equilíbrio e desequilíbrio termodinâmicos permitem prever a possibilidade da ocorrência dos processos de transferência de energia e os estados finais dos sistemas, a partir da existência de causas, supondo-se, implicitamente, a existência das condições para interação. De modo inverso, a verificação de transformações no sistema possibilita a identificação de desequilíbrios, nem sempre evidentes.

PROCESSOS SOB RESTRIÇÕES

As restrições aos processos podem ser impostas por limitações dos tipos de sistemas em que são executados ou por imposição de valores das propriedades. No primeiro caso estão os processos adiabáticos e isovolumétricos, decorrentes, respectivamente, do isolamento térmico e da rigidez dos sistemas em que são realizados. No segundo, encontram-se os processos isobáricos e isotérmicos, em que o controle sobre o valor da pressão ou da temperatura que se quer manter, não é realizado pela impossibilidade de troca de energia, ao contrário: o controle da pressão é garantido pelo fato do sistema ser flexível e permitir a realização de trabalho; e a garantia do processo ser isotérmico está na diatermicidade do sistema, que possibilita a troca de energia como calor. Na discussão seguinte, sobre os tipos de processo, em

todos os casos o sistema é fechado e excluem-se as reações químicas.

1. Processos Isovolumétricos

Os processos isovolumétricos são aquecimentos ou resfriamentos com conseqüente variação de pressão. A variável independente, portanto, é a temperatura. Neste tipo de processo não há trabalho, já que o volume não varia. A restrição é imposta pelo tipo de sistema, que é (idealmente) rígido. Além de rígido, o sistema deve ser, obrigatoriamente, diatérmico, pois, se for adiabático, torna-se isolado, não servindo a qualquer propósito.

Existem situações em que, embora o sistema não seja rígido, comporta-se como se o fosse: é o caso dos sistemas líquidos e sólidos. Seus coeficientes de dilatação térmica têm baixo valor e, por isso, sob determinadas condições as variações de volume podem ser suficientemente pequenas para que o trabalho produzido seja insignificante.

2. Processos Isobáricos

Os processos isobáricos ocorrem com a pressão do sistema constante. Tratam-se de processos de aquecimento/resfriamento ou mudanças de fase, em que há variação de volume.

No estado inicial o sistema encontra-se em equilíbrio mecânico com a vizinhança. O processo se inicia por um desequilíbrio térmico — a temperatura é a variável independente. Ocorre calor e o aquecimento ou resfriamento do sistema é causa para o surgimento de desequilíbrio mecânico; ou, a variação de volume devido à mudança de fase causa a variação da pressão do sistema.

Em qualquer caso, é necessário que o sistema seja flexível, para que a diferença de pressão entre sistema e vizinhança, seja neutralizada por uma correspon-

dente variação de volume que restaura o valor da pressão inicial. Admite-se que desequilíbrio é prontamente neutralizado, de modo que não há um afastamento significativo da condição de equilíbrio mecânico, ou seja: a pressão do sistema é suficientemente alterada para produzir a variação de volume, porém, em uma quantidade tão pequena que os instrumentos de medida não acusam a alteração. Por isso o processo é isobárico.

Em geral admite-se que o processo ocorre em equilíbrio mecânico. Entretanto, há quem entenda que o processo não ocorre em equilíbrio, mas, em quase-equilíbrio.

A restauração da pressão inicial só ocorre se a pressão da vizinhança não for apreciavelmente perturbada pela variação de volume do sistema. De fato, se o sistema é submetido a uma variação de volume, sua vizinhança é submetida à mesma mudança, embora em sentido contrário: o que é expansão em uma das partes do universo, é compressão na outra. Porém, se a vizinhança é suficientemente grande para que qualquer variação de volume na escala do sistema, seja insignificante na sua escala, a correspondente variação de pressão será desprezível. Em outras palavras: as variações de volume do sistema não afetam a pressão da vizinhança. Por isso, a vizinhança impõe o valor da pressão ao sistema, restaurando-o. Uma de vizinhança mecanicamente estável é a atmosfera terrestre.

Nos processos isobáricos, os sistemas devem ser flexíveis e diatérmicos, porque há troca de energia como trabalho e calor (para aquecer/resfriar o sistema ou manter a temperatura constante durante a mudança de fase). As vizinhanças devem ser suficientemente extensas para manter a pressão invariável.

3. Processos Isotérmicos

Processos isotérmicos são caracterizados pela constância da temperatura do sistema. São processos de compressão ou expansão ou mudanças de fase, com variação de volume.

No início o sistema encontra-se em equilíbrio térmico com a vizinhança. O processo é iniciado por um desequilíbrio mecânico — a pressão é a variável independente. Há uma variação de volume que causa mudança na temperatura do sistema: é preciso que o sistema seja diatérmico para que o calor recomponha o valor da temperatura inicial. Considera-se que o desequilíbrio térmico é prontamente neutralizado, de modo que a temperatura do sistema varia muito pouco, apenas o suficiente para que haja troca de energia, porém, tão pouco que não é perceptível pelos instrumentos de medida. Analogamente ao processo isobárico, pode ser entendido que o processo isotérmico ocorre em equilíbrio térmico ou quase-equilíbrio térmico. A recomposição do valor inicial da temperatura é feita por imposição do valor da temperatura da vizinhança ao sistema. A vizinhança deve ser suficientemente extensa para que qualquer variação de temperatura devido a uma variação de energia interna finita, seja infinitesimal, portanto, desprezível. Um exemplo de vizinhança desse tipo é a atmosfera terrestre. Outro exemplo são equipamentos próprios para o controle da temperatura, os termostatos, empregados quando se deseja trabalhar em temperaturas diferentes da ambiente ou necessita-se uma precisão no controle que a troca de energia com a atmosfera não proporciona.

Nos processos isotérmicos, os sistemas devem ser diatérmicos e flexíveis, pois há transferência de energia como calor e trabalho (para comprimir/expandir o sistema ou manter a pressão constante durante a mudança de fase). As vizinhanças devem ser suficientemente extensas para manter a temperatura constante, ou, deve-se empregar um termostato.

4. Processos Adiabáticos

Processos adiabáticos são aqueles realizados em sistemas termicamente isolados. Não há fixação de qualquer variável, pelo fato do sistema ser adiabático. Os processos adiabáticos de interesse neste curso, são expansões e compressões em que o volume e a temperatura variam continuamente com a pressão, que é a variável independente. Portanto, os sistemas de interesse são adiabáticos e flexíveis. (Se o sistema fosse rígido, seria isolado, e não teria utilidade.)

Apêndice 2

FORMALISMO TERMODINÂMICO

FORMALIZAÇÃO DA TERMODINÂMICA

INTRODUÇÃO

Nosso objetivo é obter expressões para a energia interna (U), a entalpia (H), a entropia (S), a função de Helmholtz (F) e a função de Gibbs (G) para cálculos com sistemas simples e fechados. Estas são funções de várias variáveis, sendo uma variável a temperatura, a segunda, pressão ou volume, e as demais são variáveis de composição das substâncias presentes. Ou seja: buscamos as expressões de

$$\begin{array}{lll} U = U(T, V, n_i) & S = S(T, P, n_i) & F = F(T, V, n_i) \\ H = H(T, P, n_i), & S = S'(T, V, n_i) & G = G(T, P, n_i) \end{array}$$

Na posse das equações e conhecedores das variações de T e P ou V e n_i , podemos calcular as variações das demais propriedades.

De modo geral, se $Z = Z(X, Y, \dots)$, sua diferencial total é dada por

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)_X dY + \dots$$

Nosso trabalho consistirá em obter expressões analíticas para as derivadas parciais, com a finalidade de proceder a integração:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \int_{X_1}^{X_2} \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)_Y dX + \int_{Y_1}^{Y_2} \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)_X dY + \dots$$

Por definição,

$$dU = dQ - dW \quad (1)$$

$$TdS = dQ \quad (2)$$

$$H = U + PV \quad (3)$$

$$F = U - TS \quad (4)$$

$$G = H - TS \quad (5)$$

Como U, H, S, F e G são funções de estado, suas variações independem da maneira de execução do processo. Logo, podemos calculá-las por processos reversíveis, o que nos permite substituir (2) em (1):

$$dU = TdS - dW . \quad (6)$$

Restringimos nosso estudo aos sistemas simples. Por isso apenas pode ocorrer trabalho de variação de volume e de variação de composição. Assim,

$$dU = TdS - PdV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (7)$$

onde

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S, V, n_k} \quad (8)$$

DEDUÇÃO DAS EXPRESSÕES.

As diferenciais totais das quais buscamos as formas analíticas são:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V, n_i} dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{T, n_i} dV + \sum_i \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i \quad (9)$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_{P, n_i} dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T, n_i} dP + \sum_i \left(\frac{\partial H}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_k} dn_i \quad (10)$$

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{P, n_i} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T, n_i} dP + \sum_i \left(\frac{\partial S}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_k} dn_i \quad (11)$$

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{V, n_i} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_{T, n_i} dV + \sum_i \left(\frac{\partial S}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i \quad (12)$$

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_{V, n_i} dT + \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_{T, n_i} dV + \sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial n_i} \right)_{T, V, n_k} dn_i \quad (13)$$

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_{P, n_i} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T, n_i} dP + \sum_i \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_k} dn_i \quad (14)$$

pois, como afirmamos anteriormente, desejamos calcular as variações de U, H, S, F e G com base no conhecimento das variações de T, P, V e n_i .

Diferenciamos H, F e G em (3), (4) e (5) e encontramos

$$dH = dU + PdV + VdP \quad (15)$$

$$dF = dU - TdS - SdT \quad (16)$$

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (17)$$

onde substituímos (7), obtendo:

$$dH = TdS + VdP + \sum_i \mu_i dn_i \quad (18)$$

$$dF = -SdT - PdV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (19)$$

$$dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i dn_i \quad (20)$$

Comparando (13) com (19), vemos que

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_{V, n_i} = -S \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{T, n} = -P \quad (22)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial n_i}\right)_{T, V, n_k} = \mu_i \quad (23)$$

Da comparação de (14) com (20), obtemos:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P, n_i} = -S \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T, n} = V \quad (25)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T, P, n_k} = \mu_i \quad (26)$$

As derivadas parciais da energia interna, da entalpia e da entropia, não são obteníveis por comparação das equações (9), (10), (11) e (12) com as outras expressões que deduzimos, pois as variáveis são diferentes. Para resolver o problema, lançamos mão da seguinte propriedade das funções contínuas:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial X \partial Y} = \frac{\partial^2 Z}{\partial Y \partial X} \quad (27)$$

Empregando (27) nas expressões (19) e (20), encontramos:

$$\left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial V}\right)_{T, n_i} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{V, n} \quad (28)$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial P}\right)_{T, n_i} = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P, n} \quad (29)$$

que compõem as equações (11) e (12).

Para obter as demais derivadas parciais, reescrevemos (7) e (18),

$$dS = \frac{1}{T} dU + \frac{P}{T} dV - \sum_i \frac{\mu_i}{T} dn_i \quad (30)$$

$$dS = \frac{1}{T} dH - \frac{V}{T} dP - \sum_i \frac{\mu_i}{T} dn_i \quad (31)$$

e introduzimos (8) em (30) e (9) em (31), de modo que

$$dS = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P \right] dV + \frac{1}{T} \sum_i \left[\left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{Y, V, n_k} - \mu_i \right] dn_i \quad (32)$$

$$dS = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT - \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T - V \right] dP + \frac{1}{T} \sum_i \left[\left(\frac{\partial H}{\partial n_i}\right)_{Y, P, n_k} - \mu_i \right] dn_i \quad (33)$$

Comparando os coeficientes de dP em (11) e (33) e os coeficientes de dV em (12) e (32), obtemos

$$\left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial V}\right)_{T, n_i} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{T, n_i} + P \right] \quad (34)$$

$$\left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial P}\right)_{T, n_i} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T, n} - V \right] \quad (35)$$

de modo que, utilizando de (28) e (29) em (34) e (35), respectivamente, chegamos a

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{T,n_i} = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{V,n} - P \quad (36)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_{T,n_i} = V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{P,n_i} \quad (37)$$

A comparação dos coeficientes de dT em (11) e (33) e em (12) e (32), nos dá

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{V,n_i} = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{V,n_i} \quad (38)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{P,n_i} = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{P,n_i} \quad (39)$$

Por calorimetria é possível determinar

$$C_P \equiv \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{P,n_i} \quad (40)$$

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{V,n_i} \quad (41)$$

como função da temperatura. Assim, (38) e (39) são determinadas e empregadas em (21) e (24), em forma integrada.

Em resumo: nas expressões (8) a (13),

(a) as derivadas parciais em relação à temperatura têm suas formas analíticas definidas a partir da capacidade calorífica da substância, enquanto que

(b) as derivadas parciais em relação à pressão e ao volume são definidas pela relação PVT adequada ao sistema em estudo.

(c) Os coeficientes de dn_i são determinados por medidas calorimétricas, com base nos conceitos de reação de formação e de entropia absoluta.

A seguir, discutiremos as capacidades caloríficas, algumas relações PVT e calcularemos variações de propriedades em sistemas unicomponentes. Na seqüência, estudaremos as reações químicas.

Apêndice 3

TESTE DE AVALIAÇÃO DE

CONHECIMENTO PRÉVIO

AO ENSINO

Salvador, __ de _____ de 199_.

Caro(a) aluno(a):

O teste anexo tem como objetivo avaliar o seu conhecimento atual sobre a termodinâmica, o que servirá como referência para o ensino da disciplina QUI013 Físico-Química I, neste semestre.

Nosso propósito é realizar um ensino facilitador da sua aprendizagem. Para tanto, faz-se necessário ter informações corretas a respeito dos seus conhecimentos atuais. Por isso, solicitamos sua colaboração na forma de respostas honestas e as mais completas possíveis. Caso V. não saiba ou não lembre como responder alguma questão, favor escrevê-lo. Não deixe questões em branco. Caso necessite de maiores informações para responder às questões (esclarecimentos, dados) solicite-as particularmente ao professor, evitando perturbar os colegas.

Cordialmente,

José Luis Silva

UFBA - INSTITUTO DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA
QUI013 FÍSICO-QUÍMICA I

QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO
DE CONHECIMENTO PRÉVIO AO ENSINO

ALUNO: _____

1. Conceituar

Calor

Temperatura

Trabalho

Processo irreversível

Energia

Entropia

Entalpia

Energia livre

Energia interna

Equilíbrio térmico

2. Um mol de gás, inicialmente a 300K e 10atm, é expandido isotermicamente contra uma pressão de oposição constante e igual a 1atm. Calcular Q e W.

3. Cem gramas de água a 75°C e 1atm são misturadas com 50 gramas de água a 30°C e 1atm. Considerando que o sistema não troca energia com a vizinhança, qual o seu estado final?

4. A entalpia padrão molar de vaporização do benzeno a 80,1°C, é 30,8kJ/mol. Calcular ΔE , Q e W para o processo de vaporização de 1 mol de benzeno a 1atm e 80,1°C.

5. A entalpia padrão de combustão da sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}(s)$) formando dióxido de carbono gasoso e água líquida, a 298K, é -5647 kJ/mol. Qual o valor da entalpia padrão de formação da sacarose a 298K?

MAPAS CONCEITUAIS

Caro(a) Aluno(a):

Um dos instrumentos de avaliação de aprendizagem utilizado nesta disciplina é o mapa conceitual. Ao longo do semestre você será solicitado a construir vários deles e o conjunto formado contribuirá para a média do curso com 10% de peso.

Acreditamos que os conhecimentos armazenados nas mentes dos indivíduos formam estruturas onde os conceitos encontram-se interrelacionados e organizados de modo hierárquico, do geral ao específico.

Com base nessa concepção de retenção do conhecimento, entendemos mapas conceituais como representações gráficas das estruturas teóricas possuídas por quem os constrói.

A construção de um mapa conceitual pode ser feita obedecendo-se ao seguinte roteiro:

1. Identifique os conceitos-chave do conteúdo que irá mapear, listando-os. A princípio, evite um número superior a dez. Se o mapa se refere, por exemplo, a um texto, o número de conceitos está limitado pelo próprio material. Se refere-se ao seu conhecimento sobre determinado assunto, mais conceitos poderão ser adicionados após o primeiro mapeamento.
2. Ordene os conceitos colocando o(s) mais geral(is) no topo do mapa e acrescente os demais por grau de especificidade. É importante ter em mente o contexto em que os conceitos estão sendo considerados.
3. Ligue os conceitos com linhas e rotule-as com uma ou mais palavras que definam as relações entre os conceitos. Os conceitos e as palavras devem formar uma proposição que explicita o significado da relação.

4. Exemplos específicos podem ser agregados abaixo dos conceitos correspondentes, geralmente na base do mapa.
5. Em geral, o mapa obtido na primeira tentativa possui simetria pobre com alguns grupos de conceitos mais bem localizados que outros. É, portanto, importante revisar o mapa e refazê-lo parcial ou totalmente, se necessário.
6. Lembre-se: não existe uma única maneira de traçar um mapa conceitual. À medida que seu entendimento das relações entre os conceitos se modifica, o mapa sofre alterações. Um mapa conceitual deve ser entendido como algo dinâmico, que reflete o entendimento conceitual de quem o constrói, no momento em que o faz.

IMPORTANTE: Traga sempre consigo estas instruções. Vários mapas conceituais deverão ser construídos ao longo do semestre, em sala de aula, sem aviso prévio.

Construa um mapa conceitual para a termodinâmica utilizando os conceitos listados abaixo:

Calor

Processo irreversível

Entropia

Entalpia

Energia interna

Temperatura

Energia

Trabalho

Energia livre

Equilíbrio térmico

Explique as razões para a hierarquia adotada.

Apêndice 4

MAPAS CONCEITUAIS CONSTRUÍDOS PELOS ALUNOS

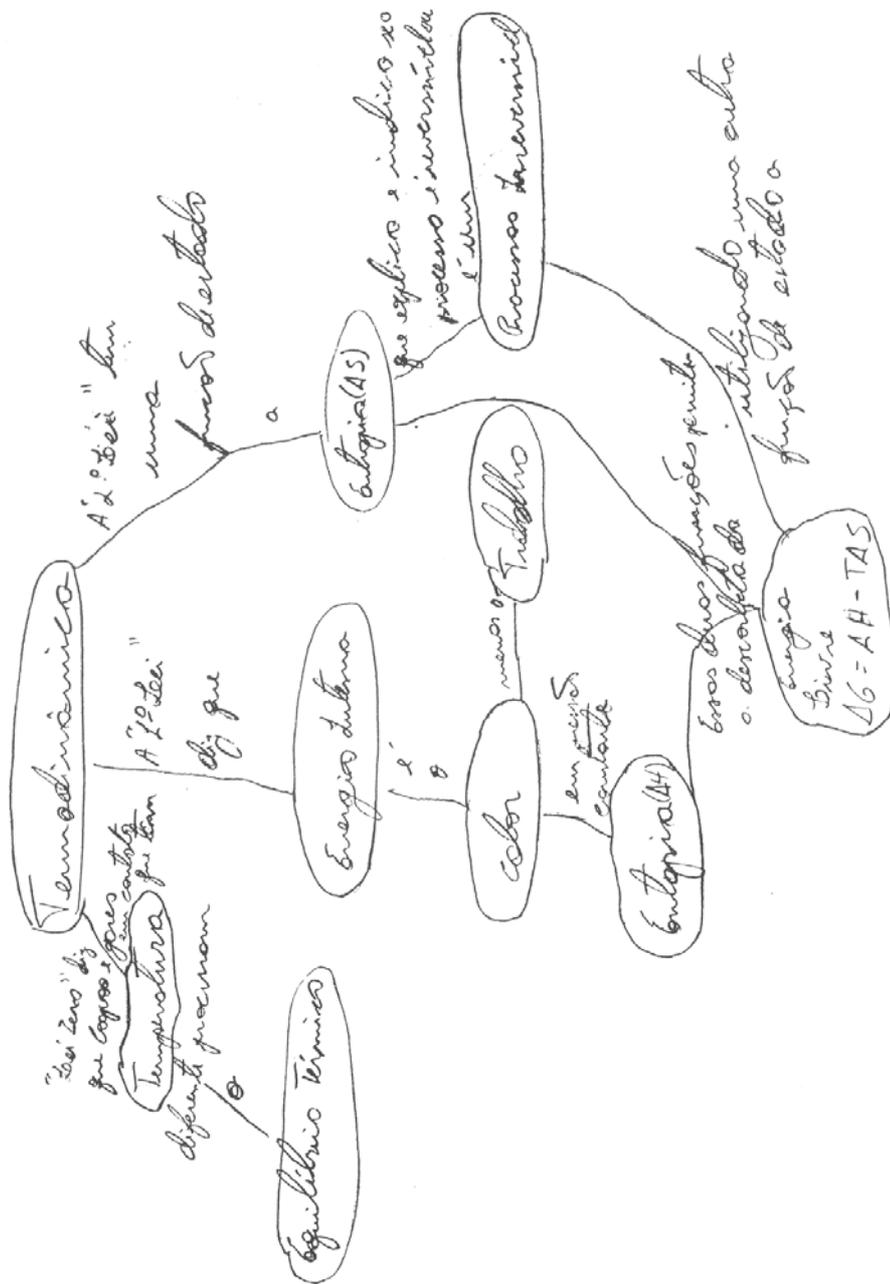


FIGURA A4-1: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO F5

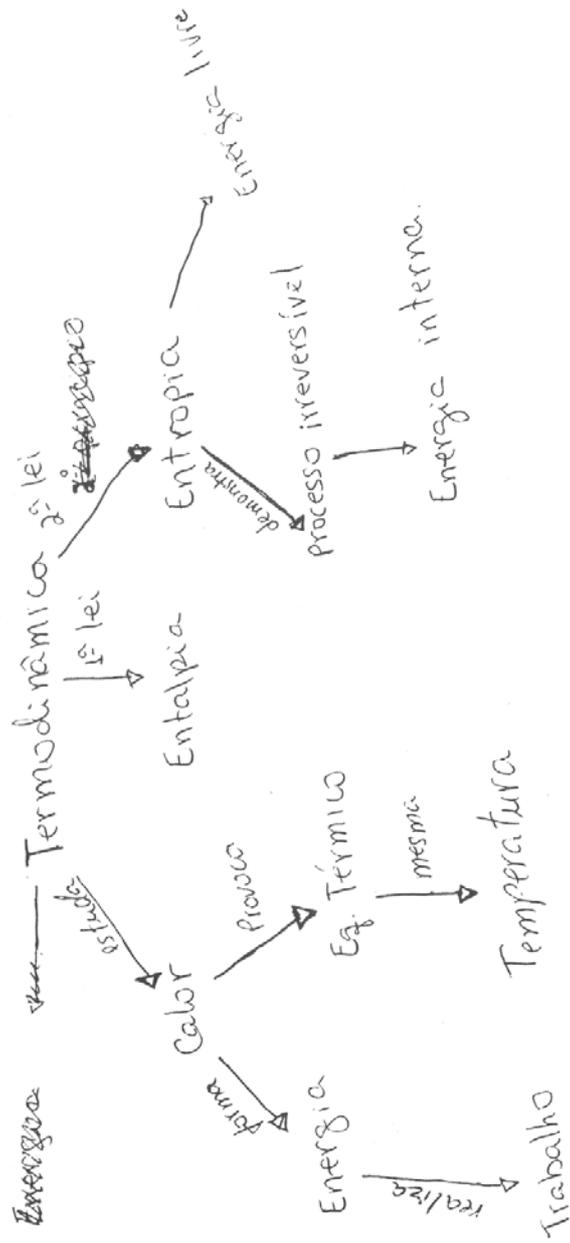


FIGURA A4-2: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO K4

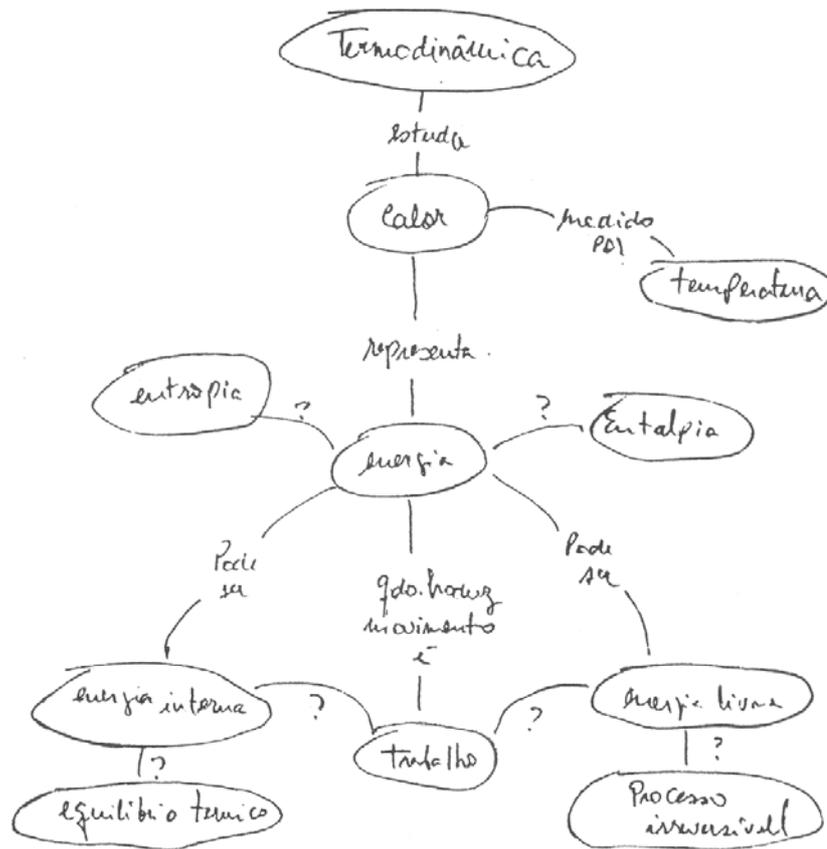


FIGURA A4-3: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Tr5

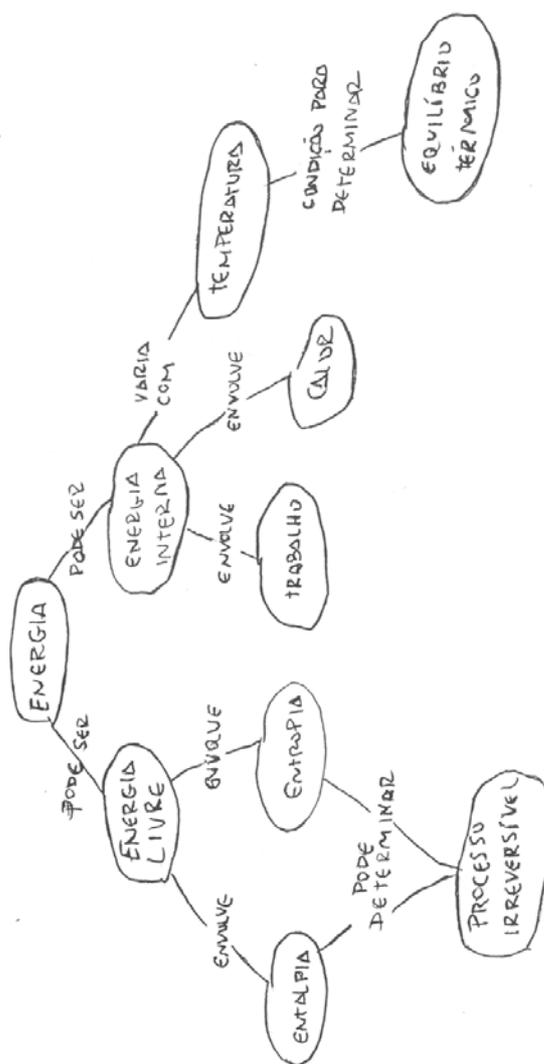


FIGURA A4-4: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO A4

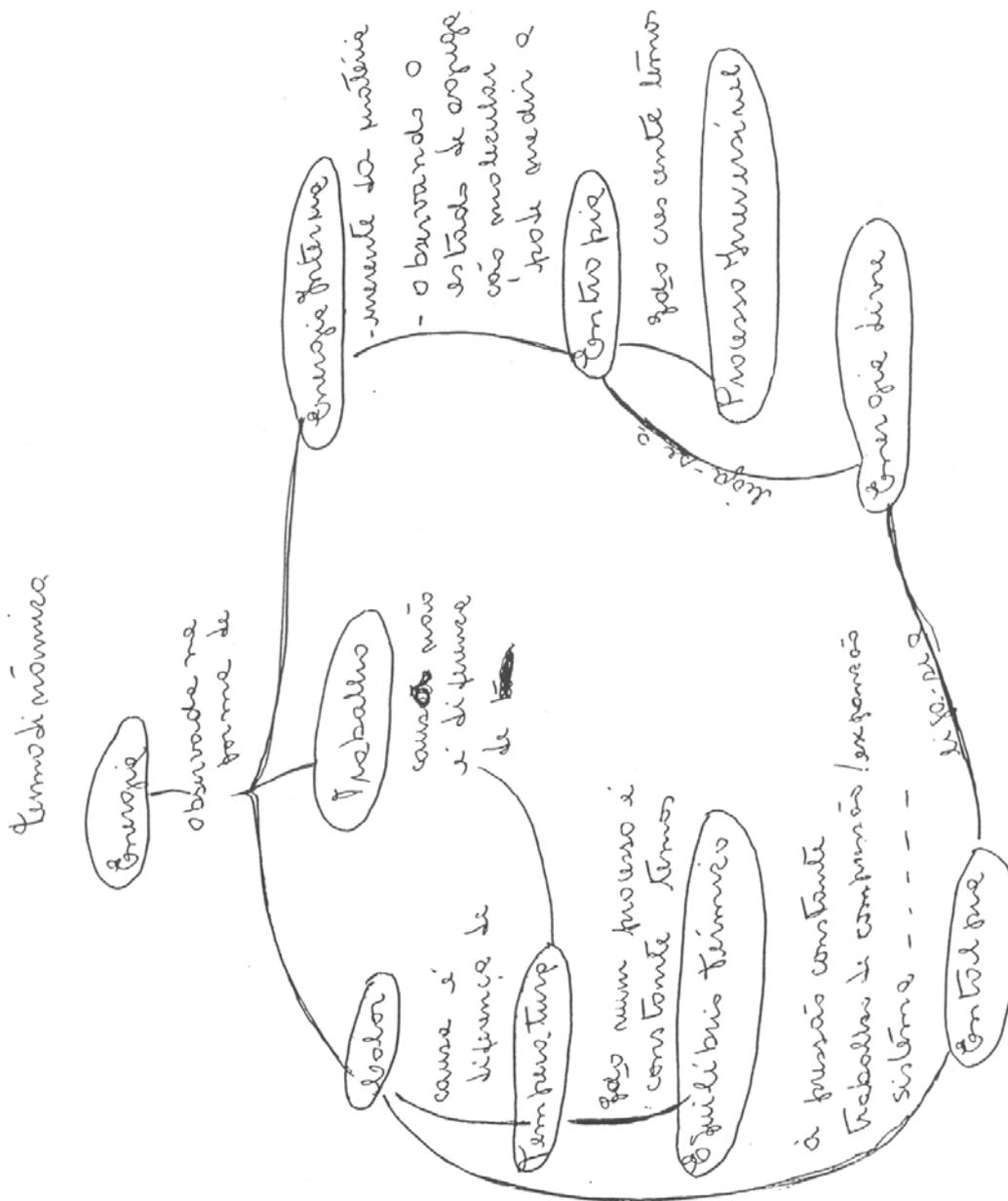


FIGURA A4-5: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Je5

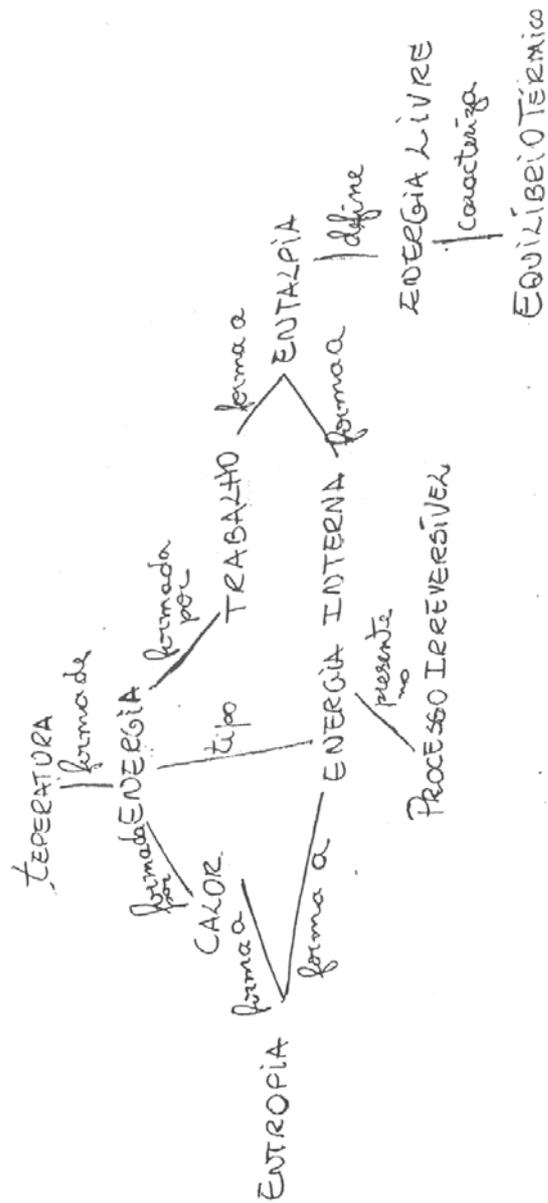


FIGURA A4-6: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO I55

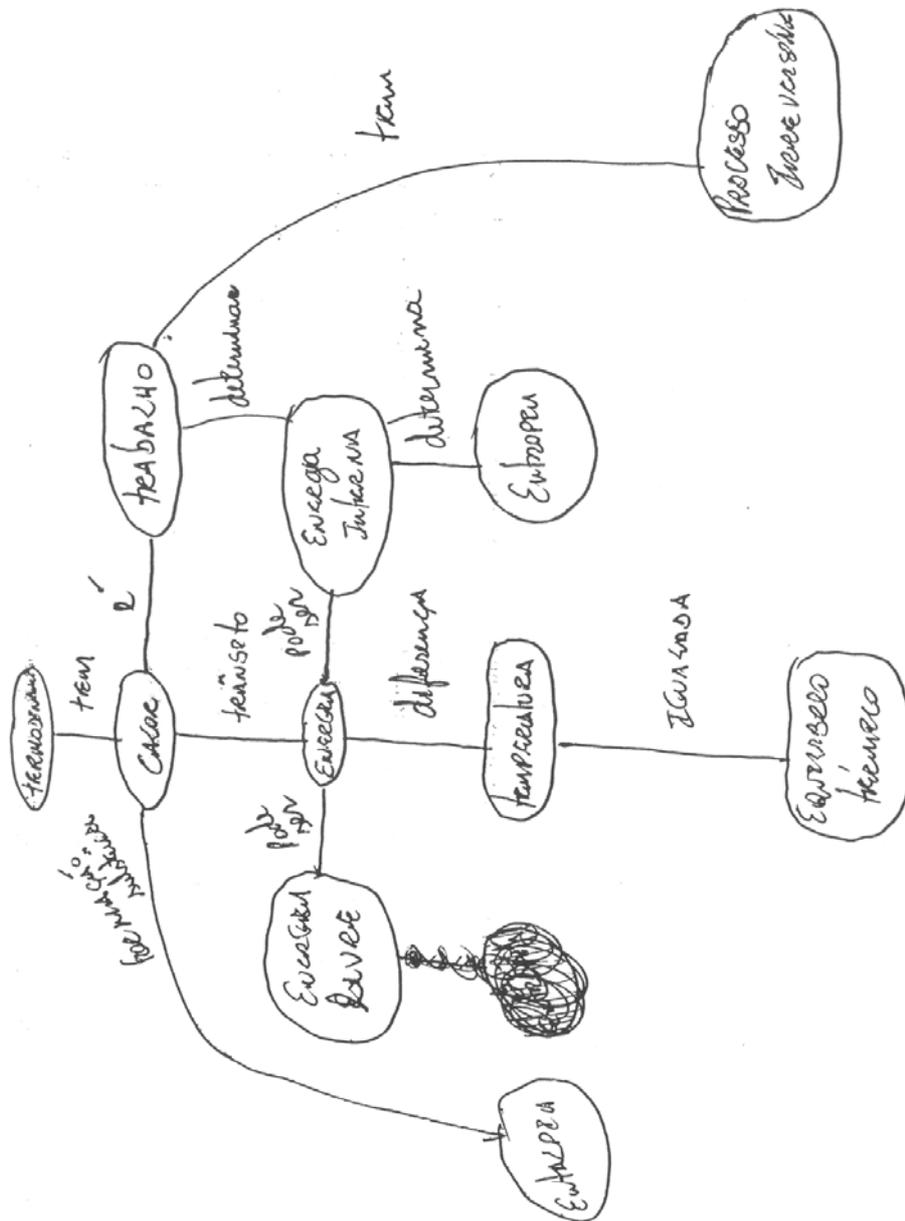


FIGURA A4-7: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO W4

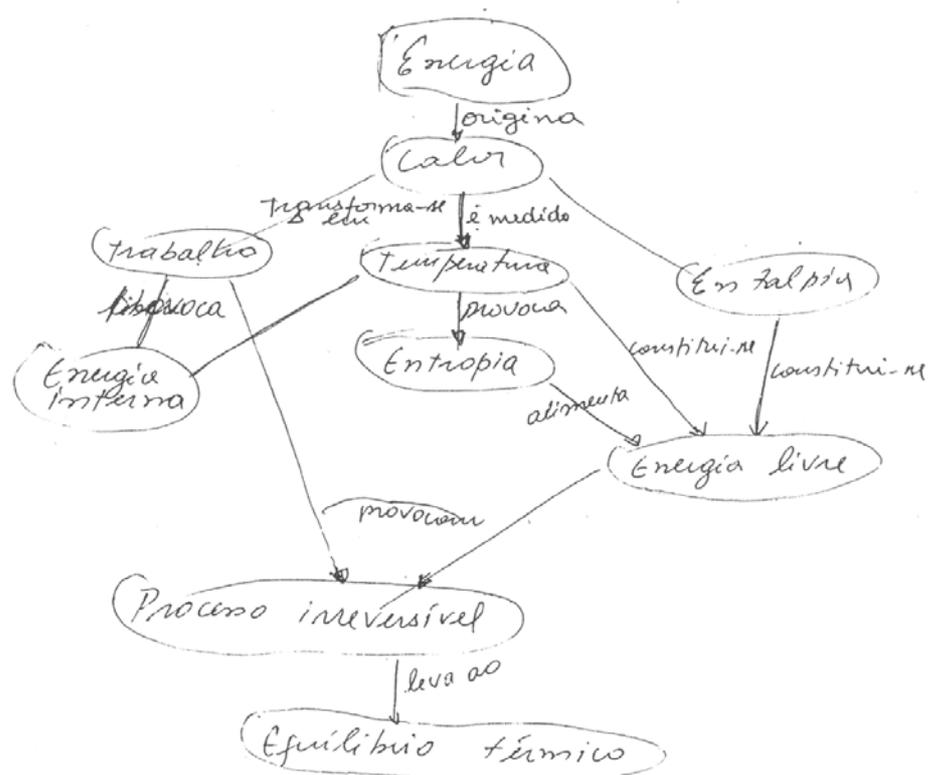


FIGURA A4-8: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Ap4

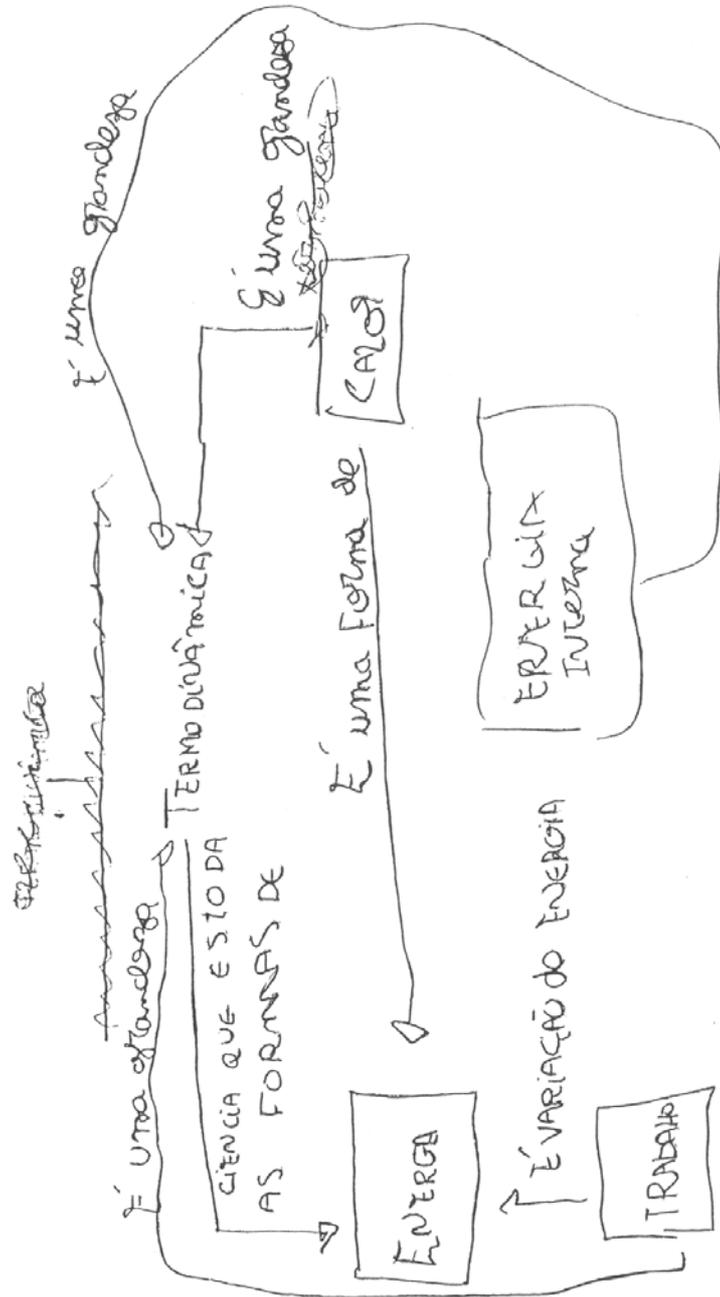


FIGURA A4-9: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Ar8

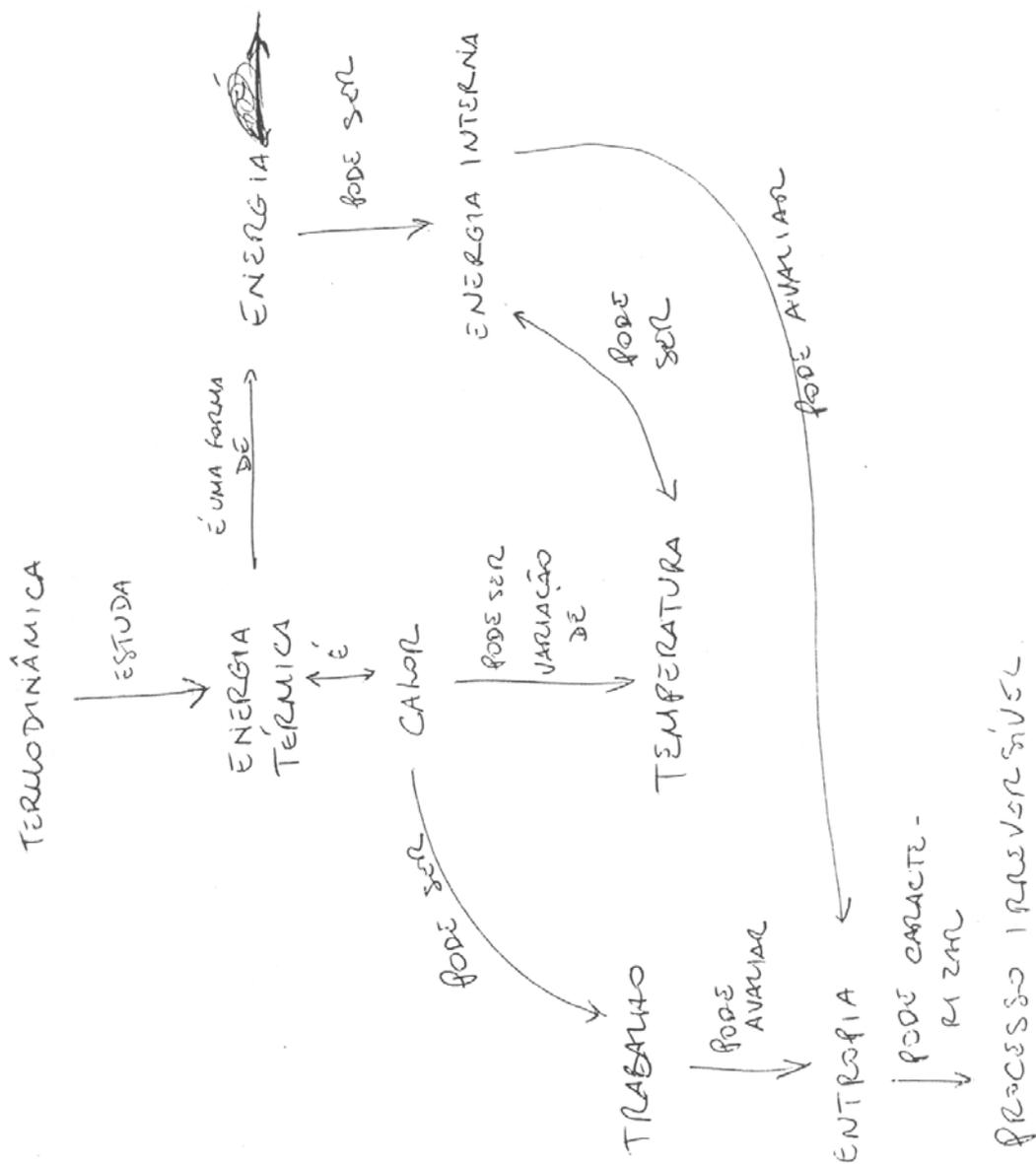


FIGURA A4-10: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Rd8

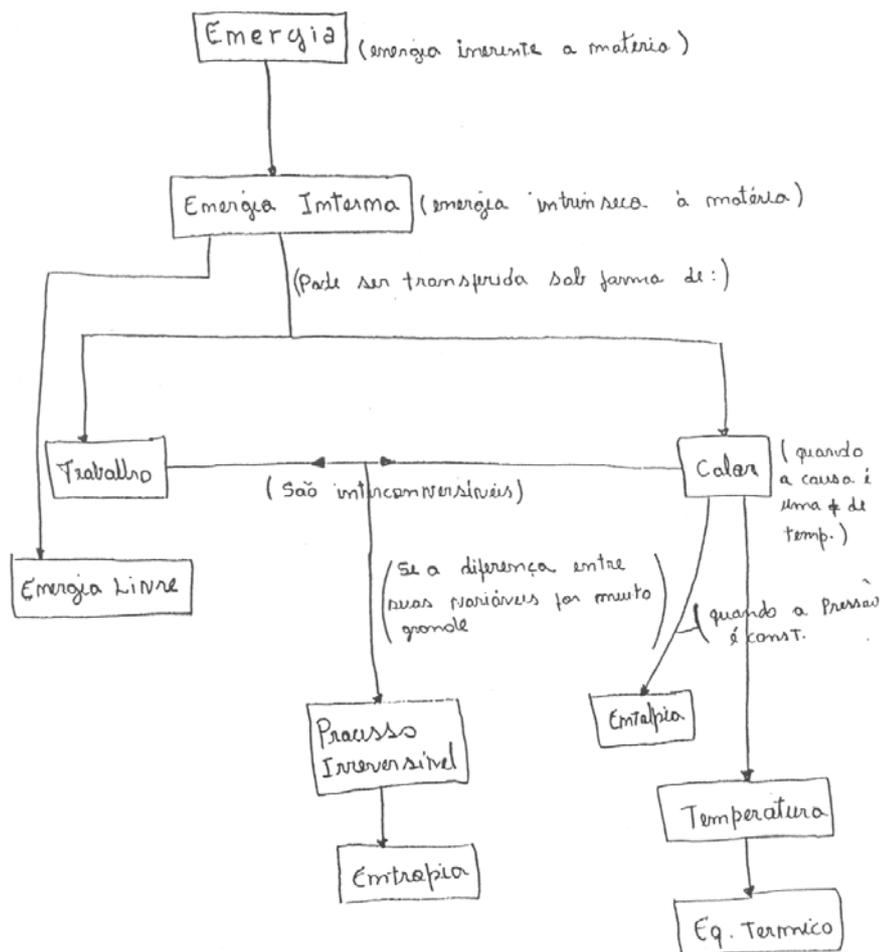


FIGURA A4-11: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO CA4

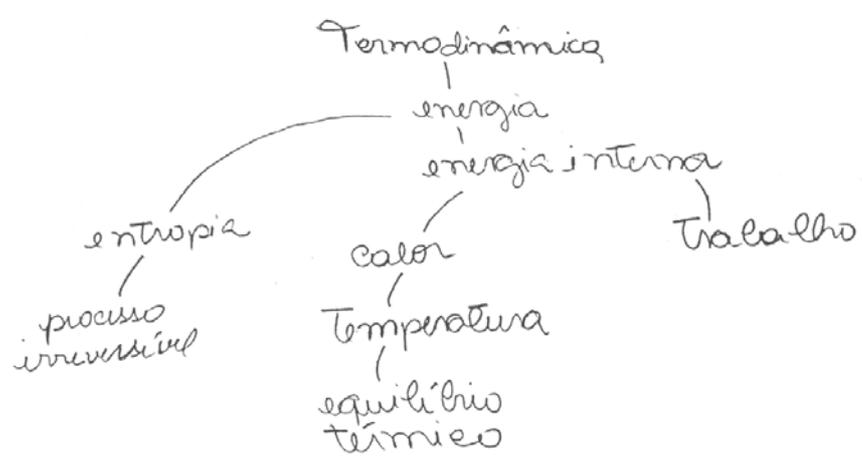


FIGURA A4-12: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO Rm8

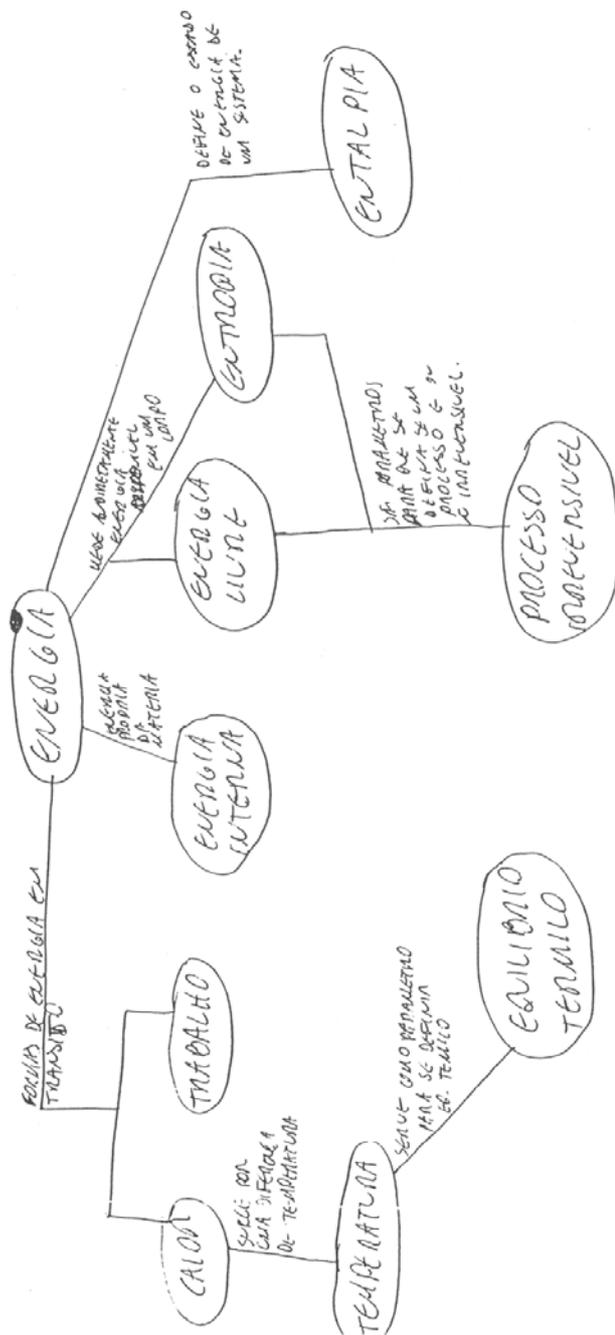


FIGURA A4-13: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO AM4

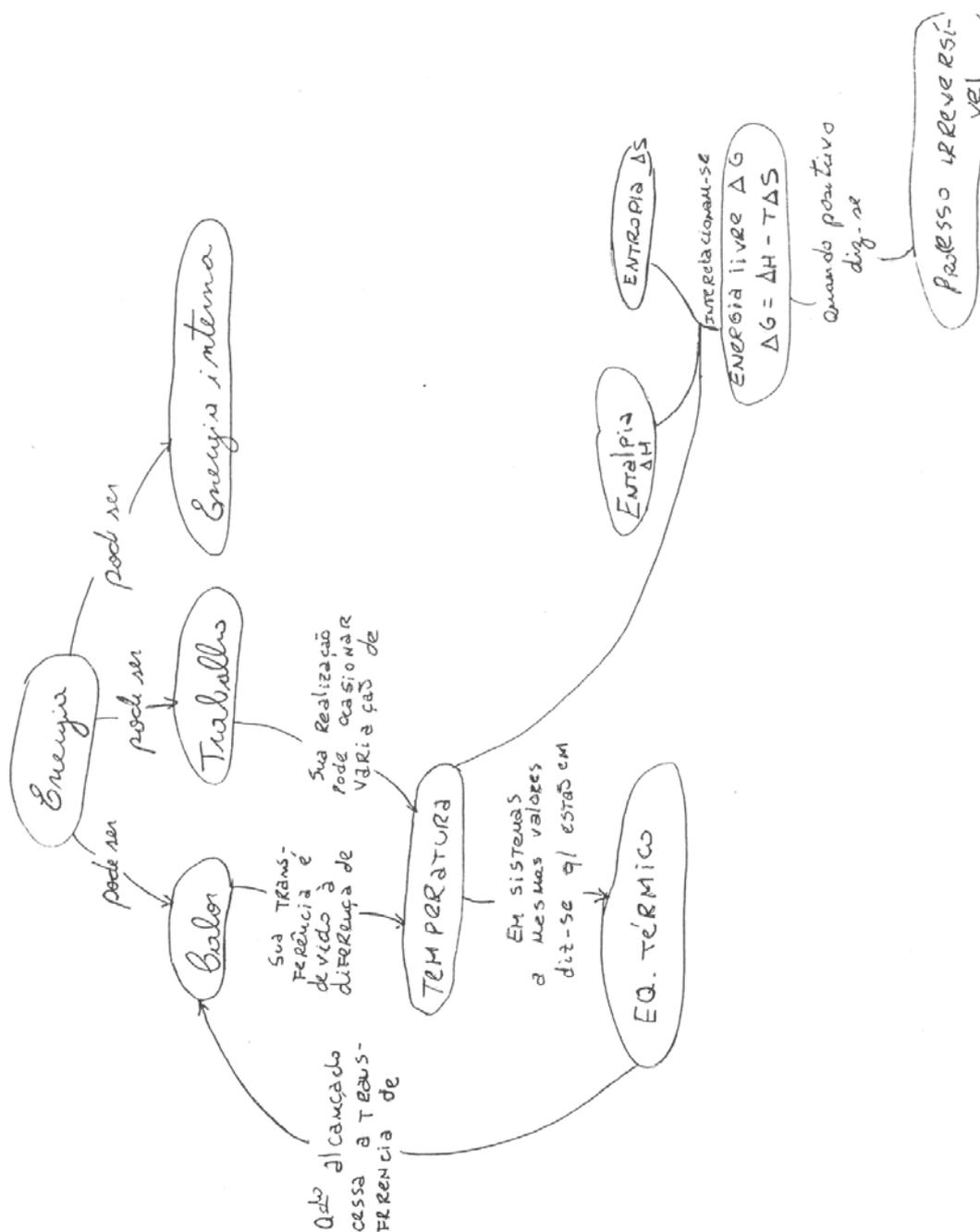


FIGURA A4-14: MAPA CONCEITUAL DO ALUNO A15