



UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
FÍSICA-LICENCIATURA



**TERMODINÂMICA: CONSTRUINDO UM ENSINO,
PARTINDO DE UMA PROPOSTA INVESTIGATIVA**

JOSÉ ALVES MENDES JÚNIOR

CARUARU - PE
2018

José Alves Mendes Júnior

**TERMODINÂMICA: CONSTRUINDO UM ENSINO, PARTINDO DE UMA
PROPOSTA INVESTIGATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Física-Licenciatura. Núcleo de Formação Docente, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar Lima Moreira.

CARUARU-PE
2018

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4-1242

M538t Mendes Júnior, José Alves.
 Termodinâmica: construindo um ensino, partindo de uma proposta investigativa. /
 José Alves Mendes Júnior. – 2018.
 97f. ; il. : 30 cm.

 Orientador: Augusto Cesar Lima Moreira.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de
 Pernambuco, CAA, Licenciatura em Física, 2018.
 Inclui Referências.

 1. Termodinâmica. 2. Física – Estudo e ensino. 3. Investigação científica. 4.
 Experimentos. I. Moreira, Augusto Cesar Lima (Orientador). II. Título.

371.12 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2018-150)



**Campus
AGRESTE**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
GRADUAÇÃO EM FÍSICA - LICENCIATURA**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA NA
DISCIPLINA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

JOSÉ ALVES MENDES JÚNIOR

Título

**“TERMODINÂMICA: CONSTRUINDO UM ENSINO,
PARTINDO DE UMA PROPOSTA INVESTIGATIVA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: **AUGUSTO CESAR LIMA MOREIRA**, NICEN/UFPE; **GUSTAVO CAMELO NETO**, NICEN/UFPE e **PAULO HENRIQUE RIBEIRO PEIXOTO**, NFD/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o graduando **JOSÉ ALVES MENDES JÚNIOR APROVADO**.

Caruaru, 13 de julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

De início, quero agradecer a Deus por mais esse caminho percorrido. Pois, sem Ele eu não teria forças para continuar a longa trajetória que foi trilhada para concluir este curso. Gratifico ao Prof. Dr. Augusto Cesar Lima Moreira, por estar presente com seus conselhos e orientações sempre precisos e valiosos. A sua ajuda possibilitou a criação e construção deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Haja vista, que meu Orientador foi decisivo para chegar ao termino deste trabalho, logo seus ensinamentos contribuíram bastante para potencializar e enriquecer esta monografia.

Agradeço a todos os professores que passaram por meu percurso acadêmico em todo o curso, em especial aos docentes: Dr. Gustavo Camelo Neto, Dr. Paulo Henrique Ribeiro Peixoto, Me. Maria do Desterro Azevedo da Silva, Dr. Charlie Salvador Gonçalves. Venho agradecer à assistente social, Patrícia Costa, que me ajudou e deu-me apoio em todo o decorrer do curso de Física-Licenciatura.

Uma pessoa importante que merece ser gratificada é minha mãe (Maria José de Oliveira Mendes), pois me proporcionou uma educação necessária para chegar onde cheguei hoje. Agradeço também a toda minha família, por estar sempre presente nas dificuldades que enfrentei nessa jornada que percorri. Venho também agradecer a todos os meus amigos que contribuíram de alguma forma para que eu chegasse a terminar este curso, em especial Allamys Allan Dias da Silva.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”
Josué 1:9

RESUMO

O trabalho a seguir contempla uma pesquisa desenvolvida com um grupo de alunos dos cursos de Licenciatura em Física, Química e Matemática da Universidade Federal de Pernambuco (Campus Caruaru), submetidos à atividades de demonstrações investigativas, onde uma sequência experimental - envolvendo temas de Termodinâmica, em especial os conceitos de calor, pressão e temperatura - foi realizada com a perspectiva de gerar situações problematizadoras que proporcionassem um levantamento de concepções espontâneas e gerassem conflitos cognitivos referentes a esses conceitos, mediante a exposição de estudantes diante de um mesmo fenômeno abordado de duas formas diferentes. Como resultado da sequência proposta, observamos que mesmo tendo passado por algum processo instrucional sobre a temática ao longo de sua formação algumas concepções espontâneas persistem na estrutura cognitiva de modo que ao se deparar com um mesmo fenômeno apresentado com outro arranjo experimental, ele ajusta os conceitos presentes em sua estrutura cognitiva de forma a adaptar uma explicação para cada situação. Tal passagem evidencia a existência de vários modelos mentais em paralelo para abranger um mesmo fenômeno em suas diferentes formas.

PALAVRAS-CHAVE: Termodinâmica; Propostas Investigativas; Conflito Cognitivo

ABSTRACT

The following work contemplates a research developed with a group of undergraduate students in Physics, Chemistry and Mathematics Teachers of the Federal University of Pernambuco (Caruaru Campus), submitted to investigative demonstration activities, where an experimental sequence - involving thermodynamics, in particular the concepts of heat, pressure and temperature - was carried out to generate problematizing situations that would provide a survey of spontaneous conceptions and generate cognitive conflicts related to these concepts by exposing students to the same phenomenon addressed in two ways many different. As a result of the proposed sequence, we observe that even though we have undergone some instructional process on the theme throughout its formation, some misconceptions persist in their cognitive structure, in such a way that when faced with the same phenomenon showed with another experimental arrangement, the students adjust the concepts (present in their cognitive structure) in order to adapt an explanation for each situation. This passage evidences the existence of several mental models in parallel to cover the same phenomenon in its showed in different forms.

KEYWORDS: Thermodynamics; Investigative Proposals; Cognitive Conflict

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	IDEAIS DE AUSUBEL, ENVOLVIDAS EM UMA PROPOSTA INVESTIGATIVA	11
2.1	O material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo.....	12
2.2	O aprendiz deve apresentar predisposição para aprender	14
3	A EXPERIMENTAÇÃO NA CRIAÇÃO DE CONFLITOS COGNITIVOS.....	18
3.1	Utilização dos experimentos	19
3.1.1	Primeira questão	19
3.1.2	Segunda questão	20
3.1.3	Terceira questão	22
4	EXPLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	24
4.1	Explicação dirigida ao Ensino Médio	24
4.1.1	Experimento realizado com a vela	24
4.1.2	Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro.....	26
4.1.3	Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro (efeito oposto)	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Construção e análise das categorias	28
5.2	Respostas às configurações hipotéticas.....	32
6	POSSÍVEIS COLABORAÇÕES DO TRABALHO EM SALA DE AULA.....	37
6.1	Demonstração investigativa.....	37
6.2	Questões abertas.....	38
6.3	Laboratório aberto (ou semiaberto)	38
6.4	Avaliação diagnóstica.....	39
6.5	Avaliação formativa	40
	CONCLUSÕES	42
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO SOBRE O EXPERIMENTO DA VELA.....	46
	APÊNDICE B – MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFECCIONAR OS EXPERIMENTOS.....	51
	APÊNDICE C – GUIA PRÁTICO DE CONSTRUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	54
	APÊNDICE D - ALGUNS CONCEITOS ENVOLVIDOS NA EXPERIMENTAÇÃO	58

1 INTRODUÇÃO

O trabalho proposto vai se embasar na teoria da Aprendizagem Significativa (Moreira, 2012) – valendo-se metodologicamente de uma Proposta Investigativa (Carvalho, 2014), com a finalidade de proporcionar “**conflitos cognitivos**” e perceber as “**concepções espontâneas**” de cada aluno sobre a temática trabalhada na apuração dos dados obtidos na pesquisa. Espera-se que ao gerar conflitos cognitivos, a possibilidade do aluno adentrar em um processo de aprender significativamente em detrimento de uma aprendizagem mecânica sem compreensão de conceitos e significados. Contudo, a “**Proposta Investigativa**” é o tipo de prática que favorece o ensino aprendizagem, pois estabelece à relação do cotidiano do aluno a investigação científica. Por meio de uma atividade investigativa tentamos mostrar ao docente, que a importância das atividades baseadas em experimentos são muitas e vão desde: o crescimento do aluno nas habilidades procedimentais e atitudinais, o maior desempenho no convívio escolar quanto na sua formação como pessoa no meio social em que está inserido e outros. Carvalho (2014, pag. 49) defende que para Gil e Castro (1996) as importâncias das demonstrações investigativas são:

1. Favorecem a reflexão dos estudantes sobre a relevância e o possível interesses das situações propostas;
2. Potencializam análises qualitativas, significativas, que ajudam a compreender e acatar situações planejadas e a formular perguntas operativas sobre o que busca;
3. Consideram a elaboração de hipóteses como atividade central de investigação científica, sendo esse processo capaz de orientar o tratamento das situações e de fazer explícitas as pré-concepções dos estudantes;
4. Consideram as análises, com atenção nos resultados (sua interpretação física, confiabilidade, etc.) a partir dos conhecimentos disponíveis, das hipóteses manejadas e dos resultados das demais equipes de estudantes;
5. Concedem uma importância especial às memórias científicas que reflitam o trabalho realizado e possam ressaltar o papel da comunicação e do debate na atividade científica;

6. Ressaltam a dimensão coletiva do trabalho científico, pois as explicações são construídas no conjunto dos alunos.

Para tal, propomos uma atividade investigativa com uma nova versão do “experimento da vela (como será explicado relatado na secção 2.1)”, trocando-se a mesma por um resistor de chuveiro ligado em uma fonte. O efeito termodinâmico é o mesmo (redução da pressão interna ao reduzir a temperatura, acarretando um aumento da coluna de líquido no interior do recipiente), entretanto, sem que haja uma chama aparente. Como veremos adiante, os resultados apontam para a coexistência de vários modelos explicativos para um mesmo fenômeno físico.

2 IDEIAS DE AUSUBEL, ENVOLVIDAS EM UMA PROPOSTA INVESTIGATIVA

A fundamentação teórica foi baseada na Teoria da Aprendizagem significativa de David P. Ausubel. David Paul Ausubel foi psicólogo e atuou nos Estados Unidos. Nasceu em 25 de outubro de 1918, no Brooklyn; e faleceu em 9 de julho de 2008, Hyde Park, Nova Iorque, Estados Unidos. Suas principais obras foram - Psicologia Educacional e a Construção do Conhecimento. Estudou em Middlesex University, Universidade Columbia e na Universidade da Pensilvânia. Mais especificamente, utilizaremos as Ideias da **“Aprendizagem Significativa”** de David P. Ausubel como opção para enfrentar possíveis dificuldades que os professores se deparam no ensino de ciências. Afinal, o que seria uma aprendizagem significativa? A aprendizagem significativa é aquele procedimento, para onde uma nova informação irá se relacionar com um aspecto considerável da estrutura do conhecimento do aprendiz. E essa associação é feita de forma não-arbitrária e substantiva (não-literal).

Então, quando falamos sobre não-arbitrária, queremos dizer que existe uma relação lógica e evidente entre o novo conceito e algum outro já pertencente na estrutura cognitiva do educando. Isto é, o novo conhecimento não é conduzido à força, porém há uma interação coerente por meio da nova informação e o conceito relevante presente na estrutura cognitiva do aluno. Logo, não-literal ressalta que uma vez compreendido certo conteúdo, o estudante vai conseguir explaná-lo com suas próprias palavras, ou melhor, quando o aluno aprende determinado conteúdo e consegue utilizar sinônimos para esclarecê-lo de forma clara e concisa com o mesmo significado, podemos assim dizer que a aprendizagem foi significativa. Moreira (2012, p.28) estabelece que para Ausubel a aprendizagem significativa é:

Aquela em que ideias expressas simbolicamente interagem de maneira substantiva e não-arbitrária com aquilo que o aprendiz já sabe. Substantiva quer dizer não-literal, não ao pé da letra, e não-arbitrária significa que a interação não é com qualquer ideia previa, mas sim com algum conhecimento especificamente relevante já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende.

No entanto, para fazer o aluno aprender significativamente, é preciso levar em consideração que o aprendiz deve ter um conhecimento prévio (subsunçor) adequado sobre determinado conteúdo. Moreira (2012, p.28) esclarece que para Ausubel:

Subsunçor é o conhecimento específico (prévio), existente na estrutura de conhecimento do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por o aprendiz descoberto. Ex: proposições, modelos mentais, construtos pessoais, concepções, ideias, representações sociais e, é claro, conceitos, já existentes na estrutura cognitiva de quem aprende.

Portanto, o subsunçor é empregado para possibilitar que esse novo saber seja incluído na estrutura cognitiva do educando, assim sendo, o subsunçor é uma concepção importante que irá se unir ao conhecimento recém apresentado ao aprendiz. Haja vista, que para aprender significativamente é preciso ter, em princípio, duas condições importantes. A primeira delas seria:

2.1 O material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo

Implica enfatizar que o material entendido precisa ser associável, precisa ser incorporável à estrutura cognitiva do aprendiz por meio de subsunçores capazes de realizar essa interação, de maneira não-arbitrária e não-literal. Todavia, se o aluno não contém subsunçores adequados o material não é potencialmente significativo para o mesmo. Prontamente, o próprio aprenderá de maneira mecânica. A aprendizagem mecânica se dá de maneira arbitrária e literal, pois o aprendiz não relaciona o novo conhecimento com o seu subsunçor. Assim, o aluno não tem conhecimento prévio sobre determinada informação a ele apresentada. Já para o caso literal, o educando repete toda a informação de forma automática (é apenas refletido o que foi supostamente aprendido pelo aprendiz). Na aprendizagem mecânica a nova ideia não se interliga de forma coerente e nem clara com nenhum subsunçor existente na estrutura cognitiva do sujeito. Tendo em vista, que a aprendizagem mecânica não

garante a flexibilidade da informação recebida e tão pouco a durabilidade da própria. De acordo com Moreira (2012, p.24):

A primeira condição implica 1) que o material de aprendizagem (livros, aulas, aplicativos, ...) tenha significado lógico (isto é, seja relacionável de maneira não-arbitraria e não-literal a uma estrutura cognitiva apropriada e relevante) e 2) que o aprendiz tenha em sua estrutura cognitivas ideias-âncoras com as quais esse material possa ser relacionado. Quer dizer, o material deve ser relacionável a determinados conhecimentos e o aprendiz deve ter esses conhecimentos prévios necessários para fazer esse relacionamento de forma não-arbitraria e não-literal.

Um material potencialmente significativo precisa que, necessariamente seja inserido de várias formas na aprendizagem do aluno. Pois, para uma aula didática, é necessário ter vários recursos em mãos, tais como: vídeos, slides, experimentos, simulações, softwares e tantos outros materiais de apoio que facilite a captação do novo conhecimento, possibilitando a passagem do aluno passivo (o aprendiz que não participa, não questiona, não argumenta e não faz parte da construção do seu conhecimento) para o aluno ativo (o aprendiz que expõe suas ideias elaborando suas próprias hipóteses, defendendo e questionando seus pontos de vista) por meio de uma “**Proposta Investigativa**”. Uma Proposta Investigativa teria como fundamento uma metodologia que levasse o aluno a desenvolver seu senso reflexivo e crítico sobre determinado conteúdo, demonstrado a partir de um fenômeno ilustrativo. Carvalho (2014, p. 47) propôs que:

Para uma atividade poder ser chamada de investigativa, ela precisa estar acompanhada de situações problematizadoras, questionadoras e de diálogo, envolvendo a resolução de problemas e levando a introdução de conceitos. Essa investigação, porém deve ser fundamentada, ou seja, é importante que a atividade de investigação faça sentido para o aluno, de modo que ele saiba o porquê de estar investigando o fenômeno que a ele é apresentado. Para isso, é fundamental nesse tipo de atividade que o professor apresente um problema relacionado ao que está sendo estudado.

Uma das maneiras de tornar um material potencialmente significativo seria utilizar uma demonstração experimental problematizadora que consiga proporcionar “**conflitos cognitivos**” nos alunos, ou seja, produzir hostilidades entre seus conhecimentos espontâneos e os novos conhecimentos apresentados sobre uma temática vivenciada no seu cotidiano. Tendo em vista, que diante de um fenômeno completamente novo, o aprendiz vai utilizar o seu conhecimento espontâneo para tentar explicar o que está por traz do evento abordado. Todavia, quando o mesmo percebe que não consegue explicá-lo, é então, o momento oportuno do professor intervir como mediador para instigar o debate entre os alunos sobre a necessidade da aquisição de um novo conhecimento, Carvalho (2014, p. 48) define conflito cognitivo como uma estratégia:

Segundo o qual o aluno aprende se suas ideias espontâneas sobre determinados fenômenos são colocadas em conflito com as observáveis, ou seja, se suas previsões ou antecipações elaboradas dentro de um esquema conceitual espontâneo são contrariadas por resultados experimentais.

2.2 O aprendiz deve apresentar predisposição para aprender

A segunda condição nos informa que o aluno precisa querer realizar a interação entre o novo material e sua estrutura de conhecimento. Todavia, se o aprendiz só desejar memorizar a nova informação, o resultado do aprendizado será mecânico. Porém, se o aprendiz não tem predisposição para relacionar aquela nova ideia a sua estrutura cognitiva, o mesmo não tem a intenção de aprender significativamente. Logo, a reprodução do novo conhecimento aprendido não tem flexibilidade e longevidade (aprendizagem mecânica). Para Moreira (2012, p.25) a segunda condição necessária para se aprender significativamente seria: “O aprendiz deve querer relacionar os novos conhecimentos, de forma não-arbitrária e não-literal, a seus conhecimentos prévios. É isso que significa predisposição para aprender”. O professor tem grande papel em “**gerar**” predisposição no aprendiz, pois o mesmo pode tornar o material potencialmente significativo para o aluno. Assim sendo, o docente pode criar uma conexão entre o conhecimento espontâneo que o aluno já possui na sua estrutura cognitiva a esse

material potencialmente significativo que seria de fácil compreensão pelo estudante. Logo, acredita-se que a forma trabalhada pelo professor sobre determinado conteúdo, facilita e torna natural a predisposição para relacionar novos conteúdos com os já existentes na estrutura pensante do aluno.

No caso do ensino de ciências o docente pode fomentar o aluno a desenvolver sua predisposição para aprender de forma a analisar e argumentar sobre várias situações problematizadoras apresentadas pelo mesmo no decorrer do conteúdo ministrado. Dessa forma, o professor pode indicar uma proposta investigativa ao aluno para elaborar um conflito cognitivo que o mesmo não possa explicá-la. Esse tipo de atividade investigativa tende a fornecer a discutida predisposição para aprender. Carvalho et al (2004, p. 27) entende que:

A análise das aulas de demonstração investigativa permitiu que se verificassem as contribuições que uma atividade experimental como esta, ligada à solução de problemas e à argumentação, pode trazer para o ensino de Física. Dentre elas, estão:

- Percepção de concepções espontâneas por meio da participação do aluno nas diversas etapas da resolução de problemas;
- Valorização de um ensino por investigação;
- Aproximação de uma atividade de investigação científica;
- Maior participação e interação do aluno em sala de aula;
- Valorização da interação do aluno com o objeto de estudo;
- Valorização de aprendizagens de atitudes e não apenas de conteúdos;
- Possibilidade da criação de conflitos cognitivos em sala de aula;

Com a proposta experimental investigativa o estudante também tem a possibilidade de confrontar o conhecimento teórico com o conhecimento prático, pois o mesmo vai tentar captar um conceito abstrato a partir de um fenômeno real. O educador vem com uma atitude mais amigável sobre o referido conceito vivenciado, deixando de lado o papel de repassador do conhecimento e criando um vínculo de sabedoria com seu aprendiz. Vimos anteriormente

que no decorrer das condições para se aprender significativamente, apresenta-se um termo crucial que se destaca nas duas condições citadas anteriormente. Logo, para que o aprendiz possa aprender um novo conhecimento, o mesmo precisa ter um **“conhecimento prévio”** sobre determinado conteúdo que se queira compreender. Existe um canal no youtube defendendo que “Ausubel” (Pinheiro, 2016) expõe uma ideia sobre o fundamento primordial para a aprendizagem significativa e essa concepção seria:

“Se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um único princípio, diria isto: o fator singular mais importante que influencia na aprendizagem é **aquilo que o aprendiz já conhece**. Descubra o que ele sabe e baseie nisso os seus ensinamentos.”
(David P. Ausubel, 1968).

A teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel mostra uma grande importância do professor saber lidar com o conhecimento prévio na estrutura cognitiva do aluno. Com isso, o mesmo pode corroborar para melhorar o subsunçor do aluno antes de começar a ministrar o conhecimento pretendido. O novo conhecimento pode ser adquirido por recepção (o aprendiz recebe a informação a ser aprendida em sua forma final, mas o aluno não se comporta de forma tradicional) ou por descoberta (o aprendiz descobre o que vai aprender).

Mas, e se o aluno não tem o conhecimento prévio suficiente ou relevante sobre o assunto, o que devemos fazer? Então, Ausubel propõe que seja feita uma ponte de ligação entre os conhecimentos que o aluno já conhece (conhecimentos do seu dia-a-dia ou outras temáticas que possam ser relacionadas com o novo conhecimento a ser adquirido) e os novos conhecimentos a serem assimilados. Essa ponte de ligação é chamada de **“organizador prévio”**. Os organizadores prévios, bem aproveitados em sala de aula, poderiam ser empregados como materiais introdutórios antes de ministrar o conteúdo propriamente dito do currículo escolar, ou seja, a fim de fazer um elo de correlação entre a estrutura cognitiva (são vários subsunçores agrupados de forma que facilitam ancoragem do novo conhecimento) do aluno e o novo conhecimento a ser concedido. Para Moreira (2012, p.30), Ausubel diz que organizador prévio é:

Um recurso instrucional apresentado em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade em relação ao material de aprendizagem. Não é uma visão geral, um sumário ou um resumo que geralmente estão no mesmo nível de abstração do material a ser aprendido. Pode ser uma pergunta, um enunciado, uma situação-problema, uma demonstração, um filme, uma leitura introdutória, uma simulação.

Porém, onde se encaixa a Proposta Investigativa para auxiliar na criação de organizadores prévios em sala de aula? A partir da proposta investigativa o docente leva em consideração os conhecimentos prévios do aprendiz e suas possíveis dificuldades em aprender o suposto assunto abordado. Ao momento que o professor aplica a proposta investigativa, o mesmo tem o intuito de gerar conflitos cognitivos. Pois, ao gerar conflitos cognitivos espera-se que o aluno exponha sua forma de pensar e agir sobre determinado tema trabalhado. Tendo em vista, que ao instante que o professor instigar o aluno a debater, questionar, impor seu ponto de vista diante da dificuldade encontrada, o mesmo poderá consecutivamente criar organizadores prévios.

3 A EXPERIMENTAÇÃO NA CRIAÇÃO DE CONFLITOS COGNITIVOS

A fundamentação metodológica que utilizamos nessa atividade foi fundamentada no livro *Calor e Temperatura: Um ensino por investigação* (Carvalho, 2014). A professora Anna Maria pessoa de Carvalho, Licenciada e Bacharela em Física pela USP. Fez seu doutoramento em Educação, na área de ensino de ciências na FEUSP. É pesquisadora sênior do CNPq, professora da Pós-Graduação em Educação da FEUSP e da Pós-Graduação Interunidades de Ensino de Ciências, ambos da USP e Coordenadora do Laboratório de Pesquisa e Ensino de Física/LAPEF da FEUSP.

Adotamos para sistematização a proposta denotada de “**demonstrações experimentais investigativas**” e com um intuito de coletar dados para auxiliar uma futura investida pelo professor em sala de aula. Na proposta investigativa empregamos um fenômeno embasado no conceito referido a termodinâmica e sujeito a uma pesquisa semi-qualitativa. A pesquisa foi realizada com alunos dos cursos de graduação em licenciatura (Física, Matemática e Química), da Universidade Federal de Pernambuco (CAA). A escolha dos alunos para realizarmos a pesquisa foi de ordem aleatória, entre esses três cursos citados anteriormente. A pesquisa se efetuou com o experimento proposto em uma sala restrita com questionário aberto (o questionário se encontra no Apêndice (A) do TCC).

Com o intuito de proporcionar uma melhor coleta dos dados apurados diante do questionário abordado, empreendemos o desenvolvimento da apuração com apenas um aluno por vez (para não ocorrer influência nas respostas). O questionário foi elaborado com três questões abertas, as duas primeiras questões contém dois itens (a, b). As questões se baseiam em dois experimentos, tendo em vista que o ultimo experimento servirá para as duas últimas questões levantadas. Com intuito que qualquer pessoa (alunos, professores e etc.) venha a verificar os fenômenos trabalhados no questionário. Utilizamos materiais de baixo custo e ferramentas de uso doméstico, que podem ser encontrados facilmente em qualquer casa de construção ou mercearia. Haja vista, fizemos uma descrição das atividades pretendidas na metodologia abordada, agora iremos tratar como utilizar os aparatos experimentais na pesquisa.

3.1 Utilização dos experimentos

Todo o material necessário para confeccionar os aparatos experimentais estão descritos no Apêndice (B). O manual do passo a passo como construir os experimentos está disponível no Apêndice (C). Com os dois experimentos já confeccionados, chega o momento da apuração da pesquisa e demonstração dos fenômenos a serem vivenciados pelo participante.

3.1.1 Primeira questão

Para a primeira questão realizamos o primeiro experimento (“**experimento realizado com a vela**”), que consiste na aplicação de água na bacia de plástico (cerca de 500ml de água) e em seguida coloque quatro gotas do corante (mexa o corante com água até se transformar em um líquido homogêneo) para formação de um líquido vermelho. Logo depois, insira a vela na posição vertical sobre o líquido e em seguida acenda a mesma (como é ilustrado na Fig. 2.1.1). Quando a vela estiver acesa, espere alguns segundos e coloque o recipiente de vidro (garrafa do 1º passo) a certa altura chama da vela. Depois de certo tempo introduza o recipiente de vidro (garrafa do 1º passo) de forma que o mesmo encoste sua base no fundo da bacia (como ilustrado na Fig. 2.1.2). Em poucos instantes a vela se apagará e logo após vê-se ascender uma coluna de água no interior da garrafa (como ilustrado na Fig. 2.1.3)



Figura 2.1.1: Vela acesa na bacia com líquido vermelho.



Figura 2.1.2: Recipiente de vidro em contato com o líquido na bacia.



Figura 2.1.3: Observação da diferença de altura entre a parte interna e externa da garrafa (coluna visível do líquido no interior da garrafa).

3.1.2 Segunda questão

Na coleta dos dados para a segunda questão, empregamos o segundo experimento (**“experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro”**), que é composto por uma

bacia de plástico com líquido (igual ao experimento anterior). Logo após, introduza a garrafa do 2º passo (arranjo experimental: resistência, fios, rolha e parte menor da garrafa utilizada) na posição vertical (Fig. 2.1.4) e em seguida ligue em conjunto a fonte (coloque a fonte no limite, que seria 32V e 3A) e o interruptor simples. Quando a resistência estiver aquecida, coloque o recipiente de vidro (garrafa do 1º passo) em certa altura da resistência (análogo ao experimento realizado com a vela) e depois de alguns segundos encoste-o ao fundo da bacia com líquido (Fig. 2.1.5). Prontamente marque certo tempo, deixe passar no máximo 10.0 s para desligar o interruptor (como ilustrado nas Fig. 2.1.6). Tendo em vista, que se não desligar o interruptor a tempo, o vasilhame de vidro (garrafa do 1º passo), possa explodir e causar danos à saúde das pessoas envolvidas no desenvolvimento da experiência.



Figura 2.1.4: Resistência elétrica ligada.



Figura 2.1.5: Garrafa do 1º Passo em contato com o líquido e a bacia.

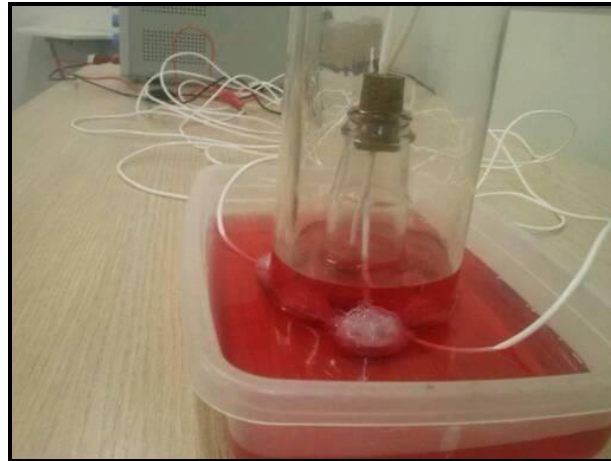


Figura 2.1.6: Observado o mesmo fenômeno.

3.1.3 Terceira questão

Aplicamos na coleta da terceira questão o término do segundo experimento, só que dessa vez é visto o efeito oposto. Utilizaremos para dar início a terceira questão a continuação do segundo experimento, pois trabalharemos já com a diferença de altura formada pelo líquido (Fig. 2.1.6) visualizada no interior do vasilhame de vidro (garrafa do 1º passo). Tendo em conta, que dessa forma fica mais fácil do participante visualizar o fenômeno em seu efeito oposto. Ao término da segunda questão, retornamos a ligar o interruptor e verificamos que a coluna de líquido formada no interior da garrafa regride (Fig. 2.1.7). Pois, simultaneamente, o volume formado pelo líquido na bacia aumenta (Fig. 2.1.8).



Figura 2.1.7: A coluna formada pelo líquido está sendo expelida.



Figura 2.1.8: O líquido interno do recipiente de vidro totalmente expelido.

A pesquisa realizada com esse trabalho tentou evidenciar o conhecimento prévio e gerar conflitos cognitivos nos participantes com o experimento proposto em várias etapas do questionário. Ao momento que analisarmos os questionários respondidos pelos alunos, os “**conflitos cognitivos**” podem aparecer por meio das interações vivenciadas à partir de uma “**proposta investigativa**”. Embasando-se nesses dados coletados, podemos perceber as concepções espontâneas fornecidas por meio de cada aluno participante, visando fornecer para o professor um material didático que sirva como apoio para futuras aulas de termodinâmica.

4 EXPLICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Com os conceitos “**Termodinâmicos**” vistos no Apêndice (D), vamos explicar os experimentos mencionados nas três questões vistas pelos alunos no decorrer da apuração dos dados para este questionário. Contudo, temos que ressaltar que não é fácil o esclarecimento, pois não estamos relatando um caso ideal, mas sim um fenômeno real que envolve muitos conceitos termodinâmicos. No entanto, passaremos uma explicação sustentada nos conceitos referidos a “Termodinâmica”.

4.1 Explicação dirigida ao Ensino Médio

4.1.1 Experimento realizado com a vela

O primeiro fenômeno que o aluno observou foi o “**experimento realizado com a vela**” que resalta a primeira questão empregada. Vamos explicar a experiência em dois momentos. Então, lidaremos agora com o **primeiro momento**. O mesmo está ligado ao instante em que acendemos a vela (Fig. 2.1.1), a própria aquece ao seu redor por meio dos 3 mecanismos de transferência de energia (condução, convecção e radiação) citados na teoria (Apêndice D). Contudo, no experimento vamos nos limitar a tratar os fenômenos apenas com dois mecanismos de transporte de calor (que são: **condução e convecção**). Sendo assim, a chama da vela acesa transfere calor por condução ao gás que está ao redor e o mesmo vem a se expandir (**dilatação térmica**). Para explicar com riqueza de detalhes a condução de um fluido para outro, iremos empregar o conceito voltado a **teoria cinética**.

Porque o pavio da vela quando é aceso ele entra em um processo denominado de **combustão**. Portanto, para ocorrer à combustão é preciso ter uma substância que forneça o combustível (pavio) e outra que forneça o comburente (O oxigênio é, portanto a substância que provoca a combustão), mas sem deixar faltar calor entre os dois (é então produzido o vapor de água e gás carbônico). Haja vista que a energia liberada irá agitar as moléculas ao redor da fonte de calor. Então, as moléculas que estão envolta do fogo e do combustível sendo queimadas receberão uma grande quantidade de calor. Então, na teoria cinética a energia de

translação média é diretamente proporcional à temperatura do sistema. As moléculas que estão mais próximas da reação tem uma energia térmica muito maior, mas estas moléculas estão se chocando com outras moléculas e transferindo energia cinética para elas.

Tendo em vista que as moléculas estariam mais afastadas depois que o gás é aquecido pelo fogo da vela. Quando passado alguns instantes e a vela queimando o oxigênio (Fig. 2.1.1), assim sendo, colocamos a garrafa a certa altura do fogo da vela. Logo, esperamos alguns segundos para colocar a garrafa em contato com líquido na bacia. Haja vista, por convecção a camada de gás aquecida ascende e penetra na garrafa, e com isso, reside mais gás aquecido no interior do vasilhame (potencializar o experimento). Depois colocamos em contato com o líquido na bacia de plástico (Fig. 2.1.2). Já para o **segundo momento**, protagonizaremos a ocasião em que a vela irá se apagar e lidaremos com suas consequências no experimento.

Onde, no segundo momento é o ponto em que a chama da vela transforma o oxigênio em gás carbônico. Assim, até ser transformado todo o oxigênio dentro do recipiente de vidro (garrafa do 1º passo) em gás carbônico a vela está acesa. Mas, quando todo o oxigênio se transformou em gás carbônico a vela se apaga (pois, não há oxigênio para ocorrer à combustão). Posteriormente, a temperatura no interior da garrafa começa a diminuir (o gás no interior da garrafa começa a se contrair). Isto é, inicia-se o **equilíbrio térmico** entre o meio ambiente (mais frio) e o gás no interior da garrafa (mais quente). Tendo em conta, que o **calor** é transmitido de um sistema a temperatura maior para o meio ambiente a temperatura menor de forma espontânea. No caso do experimento existe o transporte de calor por **condução** (ocorre entre o gás no interior da garrafa, parede do recipiente e o gás no meio ambiente), pois é quando a vela ainda está acesa e tende a continuar quando a mesma se apaga. Uma vez que, se estende até o sistema (gás contido no interior da garrafa) encontrar-se em equilíbrio térmico. Demora certo tempo até o gás entrar em equilíbrio térmico com o meio ambiente, pois é nessa transição que a pressão atmosférica vai se tornando maior do que a pressão exercida pelo gás no interior do recipiente (é nesse processo que o líquido ascende no interior da garrafa). Onde, a pressão atmosférica empurra o líquido na bacia para baixo e o mesmo força o gás (exerce baixa pressão) no interior da garrafa para cima (Fig. 2.1.3).

4.1.2 Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro

De imediato explicamos o “experimento realizado com a vela” e neste exato momento explanaremos o “segundo fenômeno”. No entanto, o esclarecimento do “**experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro**” envolve o mesmo conceito em que abordamos para o primeiro fenômeno. Mas, mesmo assim, vamos explica-lo passo a passo como foi feito para o “**experimento realizado com a vela**”. Logo, vamos convencer o leitor de que são conceitos equivalentes para os dois aparatos experimentais. Da mesma maneira, que explicamos o experimento realizado com a vela, conduziremos de igual forma o “experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro” que explana a segunda questão levantada. Para o **primeiro momento** fazemos a troca da vela pelo aparato experimental que contém a resistência elétrica de chuveiro e em seguida ligamos a mesma na fonte continua. A resistência elétrica começa a aumentar sua temperatura e por **condução** começa a transmitir calor com o meio ambiente (Fig. 2.1.4). O gás que está em seu redor se dilata, consecutivamente, coloca-se o vasilhame de vidro (garrafa do 1º passo) a certa altura da resistência que está vermelha (temperatura alta).

Se percebermos bem, o calor também é transferido por convecção e é similar ao fenômeno realizado pela chama da vela. Quando decorrido certo tempo, posicionamos a garrafa em contato com o líquido e da mesma forma deixamos passar um breve instante de tempo antes de desligar a resistência elétrica (Fig. 2.1.5). No **segundo momento**, o gás no interior da garrafa vem a transmitir calor ao meio ambiente e posteriormente a pressão atmosférica é maior que a pressão exercida pelo gás dentro da garrafa. Pois, o gás no interior da garrafa e o fluido do meio ambiente tendem a entrar em equilíbrio térmico. Logo, a transferência ocorre pelo mecanismo conhecido por condução, a interação ocorre entre o gás no interior da garrafa e a parede de vidro do recipiente. Logo após, o recipiente de vidro fornece calor ao meio ambiente (sempre por condução). Tendo em vista, que a pressão atmosférica vai ganhando espaço quando o gás no interior da garrafa se contrai e seguidamente podemos perceber a coluna do líquido no interior da garrafa sendo formada e aumentando até entrar em equilíbrio. Contudo, chega um momento em que a pressão atmosférica se torna equivalente com a pressão no interior da garrafa, e com isso, a coluna de líquido para de subir dentro do recipiente de vidro (Fig 2.1.6).

4.1.3 Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro (efeito oposto)

Acabamos de descrever a explicação voltada a primeira e segunda questão, mas neste exato momento vamos esclarecer o fenômeno referido a terceira e última questão. Haja vista que a explicação é convergente às duas questões anteriores, todavia o efeito é contrário. Na apuração dos dados, prosseguimos à partir do fenômeno já pronto da segunda questão (Fig. 2.1.6). Pois, com a coluna de líquida já formada no interior do recipiente de vidro o aluno conseguiu ver o líquido sendo expulso com mais nitidez do interior da garrafa, isso seria o fenômeno observado na terceira questão (que é quando ligamos a resistência novamente). Ao momento em que o sistema está em equilíbrio térmico com o meio ambiente (término da 2ª questão), prontamente ligamos a resistência de chuveiro e consecutivamente a temperatura no interior da garrafa começa a aumentar. Logo, o gás no interior da garrafa vem a se expandir e ocupar mais volume, assim sendo, o fluido no interior do vasilhame de vidro (garrafa do 1º passo) exerce uma pressão maior que a oferecida pela pressão atmosférica e vem a empurrar o líquido para fora da garrafa (Fig 2.1.7 e 2.1.8).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Construção e análise das categorias

De posse dos questionários dos estudantes a “triagem” das respostas foram feitas de acordo com as categorias apresentadas no Quadro 1 e no Quadro 2. Pois, neles constam duas colunas com a primeira contendo a “nomenclatura” da categoria e a segunda possuindo o “tipo/padrão de resposta” dada pelo estudante. Então, o Quadro 1 refere-se a primeira questão do item (a), segunda questão do item (a) e a terceira questão.

Quadro 4.1: Categorização das hipóteses dos estudantes nas questões Q1a, Q2a e Q3	
CATEGORIA	PADRÃO DE RESPOSTA
A1	Respostas que apresentam uma mera descrição (superficial) dos fatos observados. Ex: <i>“A água subiu porque a vela apagou”</i> . (E.14)
A2	Respostas que apresentam justificativas sob a “ótica da Química”, ou seja, a transformação/eliminação do oxigênio por meio da sua “queima”. Ex: <i>“Após tampar a vela com o copo, o espaço que era do oxigênio é preenchido pelo líquido, pois para que ocorra a combustão é necessária a presença do oxigênio”</i> . (E.20)
A3	Respostas que mesclam argumentos de “Física e de Química”, isto é, a transformação/eliminação do oxigênio por meio da sua “queima” acarreta na alteração de alguma variável termodinâmica (geralmente a pressão). Ex: <i>“(…) A chama da vela acaba consumindo o oxigênio do recipiente e com isso a pressão dentro do recipiente diminui fazendo com que o líquido suba”</i> . (E.18)
A4	Respostas que apresentam argumentos “Físicos” envolvendo uma termodinâmica alternativa, ou melhor, ou não há correlação explícita entre duas variáveis tais como pressão e temperatura (ver Ex1), ou essa correlação se dá de forma equivocada (ver Ex2). Ex1: <i>“No caso da alta temperatura da resistência há o aquecimento do ar fazendo com que o gás interno fique menos denso do que o de fora e assim a pressão empurrará o líquido e subirá pelas paredes da garrafa”</i> . (E.1)

	Ex2: “A expansão do gás. Os gases aquecidos pela resistência saem pelas laterais do copo diminuindo a quantidade de moléculas no interior do copo causando uma diminuição da pressão no interior levando à subida da coluna de água”. (E.6)
A5	Respostas que apresentam argumentos termodinâmicos envolvendo correlação entre duas variáveis tais como: pressão e temperatura, de forma “correta” sob a luz da equação de estado de um gás ideal, ou seja: Ex: “Como a resistência esquenta, ao ser tampada, aumenta a temperatura do ar de dentro da garrafa, aumentando assim a pressão do ar. Ao ser desligada, a temperatura vai diminuindo aos poucos, diminuindo a pressão dentro da garrafa aos poucos, que acaba por ficar menor que a pressão externa ao copo, por isso a água sobe”. (E.13)

Para mais detalhes, o questionário envolvido na pesquisa se encontra no Apêndice (A). Os resultados obtidos na questão 1a (que corresponde ao “**experimento realizado com a vela**”) e na questão 2a (que corresponde ao “**experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro**”) são mostrados na Figura (4.1 e 4.2), respectivamente:

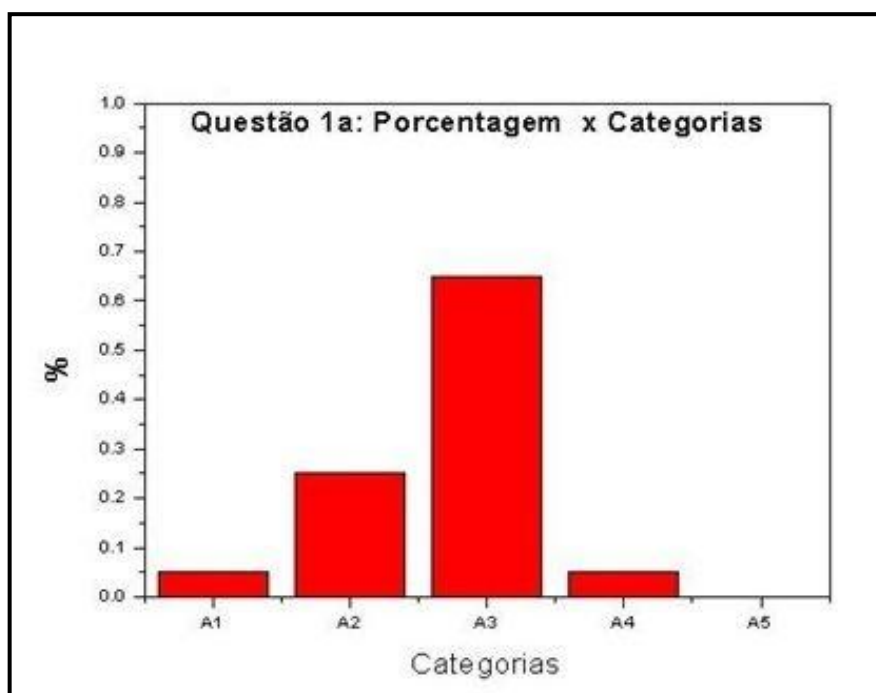


Figura 4.1: Respostas da 1ª questão (Experimento realizado com a vela).

Em se tratando do “Experimento realizado com a vela” (Fig. 4.1), pode-se notar que a presença de uma chama visível é significativa para os participantes. Desde já, sua consequência (a queima do oxigênio) possui o fator determinante nas explicações das categorias A2 e A3. Tais categorias quando somadas correspondem a 90% dos estudantes entrevistados. Tendo em vista, que todos os estudantes passaram por alguma instrução básica envolvendo os conceitos de termodinâmica. Vemos que, mesmo assim, o fator “queima do oxigênio” permanece sendo o fator relevante do processo. Em se tratando da categoria A2, esse fator não só é plausível como também é único. Já na categoria A3, onde 65% dos educandos apresentam argumentos híbridos, esse fator agrega-se ao conceito de pressão para formar um todo coerente, como mostrado na fala do 19º participante:

“No momento em que a garrafa cobre totalmente impedindo que o ar circule de dentro da garrafa para fora, a vela que estava acesa começa a queimar todo o oxigênio que estava na garrafa, com isso, houve uma diferença de pressão com essa queima, deixando a pressão menor do que a externa. Assim elevando a água para ocupar o espaço e equilibrar a pressão” (E.19).

Se prestarmos atenção neste exemplo, perceberemos que a pressão e “queima do oxigênio” são elementos complementares na explicação do fenômeno, mostrando que este último (queima do oxigênio), mesmo após um processo instrucional dentro do tema, permanece de forma considerável na estrutura cognitiva do estudante. Além disso, essa resposta híbrida reflete, ainda que de forma indireta, como os conceitos vistos em termodinâmica (tais como temperatura, pressão e volume) são percebidos por tais estudantes: apesar dessas variáveis estarem presentes na equação de estado de um gás ideal, na prática (diante de um fenômeno real), não há menção quanto às suas correlações.

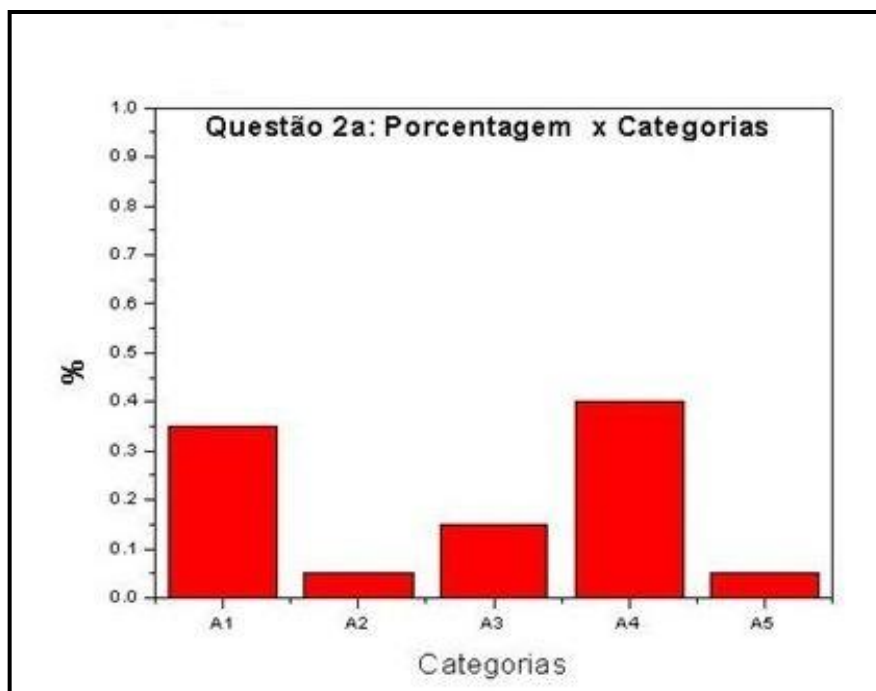


Figura 4.2: Respostas da 2ª questão (Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro).

Para a situação em que a vela foi substituída por uma resistência elétrica de chuveiro, temos uma mudança significativa na natureza das respostas diante de um mesmo fenômeno. Mas que foi apresentado de forma diferente. Haja vista, que anteriormente a causa mais importante para a queima do oxigênio era a chama da vela. Mesmo com a resistência levemente incandescente, a ausência explícita de uma chama aparente faz com que a soma das categorias A1, A4 e A5 (80%) sejam majoritárias. O fato de alguns estudantes (20%) perceberem a incandescência da resistência foi primordial para se manter a “lógica da queima do oxigênio”. Contudo, como esse fato não é tão evidente como na situação envolvendo a vela, grande parte dos estudantes, migraram das categorias A2 e A3 com 25% e 65%, respectivamente, para as categorias A1 e A4 com 35% e 40%.

Consecutivamente, conforme se pode perceber quando comparamos as figuras 4a e 4b. Essa alteração, significativa, no modo de explicar o observado é um indício de que o mesmo fenômeno termodinâmico, quando apresentado de forma distinta torna-se um elemento gerador de “conflitos cognitivos”. O exemplo abaixo mostra como um mesmo estudante (Ex), ao se deparar com um mesmo fenômeno, mas apresentado de forma diferente, altera (ajusta)

significativamente os conceitos disponíveis em sua estrutura cognitiva para tentar explicar ambas as situações conforme as falas do 13º estudante a seguir:

“Após tampar a vela com a garrafa, a combustão acaba por consumir todo o oxigênio dentro da garrafa. Assim, quando ela se apaga, é porque já não há mais ar (oxigênio) para a combustão e cria-se então um vácuo. Por isso, o líquido sobe na garrafa, devido à pressão do ar no líquido ser maior que a que o vácuo faz. (Vácuo não exerce pressão)” (Q1a, E.13).

Depois de observarmos a primeira resposta dirigida ao “experimento realizado com a vela”, trataremos a resolução do mesmo participante, mas neste momento a conclusão do estudante está voltada para o “experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro”. O 13º participante explana que:

“Como a resistência esquenta, ao ser tampada, aumenta a temperatura do ar de dentro da garrafa, aumentando assim a pressão do ar. Ao ser desligada, a temperatura vai diminuindo aos poucos, diminuindo a pressão dentro da garrafa aos poucos, que acaba por ficar menor que a pressão externa ao copo, por isso a água sobe” (Q2a, E.13).

Outro exemplo bem plausível é a solução do 12º participante, que sua resposta a respeito da 1ª questão da alternativa (a) diz: “Ao ser colocada a garrafa (fechada na parte superior) sobre a vela, a combustão consome todo o oxigênio do ambiente interior da garrafa. Ao encerrar o oxigênio disponível, o vazio que ficou “puxa” o líquido” (Q1a, E12). O mesmo aluno responde para a 2ª questão da alternativa (a), no que diz respeito: “A transferência de calor da resistência para o ambiente interno da garrafa faz gerar uma diferença de pressão entre o ambiente externo e o interno da garrafa” (Q2a, E12).

5.2 Respostas às configurações hipotéticas

Diante da possibilidade de proporcionar um ambiente desafiador para os estudantes, onde suas “ideias prévias” são desafiadas ao ponto de não conseguirem “dar conta” de explicar determinadas situações com a qual se depara, propomos duas configurações hipotéticas propostas (Q1b e Q2b), a saber:

Q1b - *Se a vela pudesse ser acesa já dentro do copo, com o recipiente de vidro fazendo contato com a água, em sua opinião o que aconteceria? Justifique sua resposta.*

Q2b - *Se a resistência pudesse ser ligada já dentro do copo, com o recipiente de vidro fazendo contato com a água, em sua opinião o que aconteceria? Justifique sua resposta.*

Após uma primeira análise, uma nova forma de arranjar e expor os resultados para as situações hipotéticas são mostradas no quadro a seguir:

Quadro 4.2: Categorização das hipóteses dos estudantes nas questões Q1b e Q2b	
CATEGORIA	PADRÃO DE RESPOSTA
B1	- Aconteceria a mesma coisa: subiria uma coluna de líquido. - As respostas contêm os mesmos argumentos e construções que as respostas dadas aos eventos até então observados, ou seja, respostas semelhantes ou basicamente iguais ao item a (da mesma questão) das referidas questões, preservando assim sua categoria (Ax, $x = 1, 2, 3, 4$ e 5) intacta.
B2	- Aconteceria a mesma coisa: subiria uma coluna de líquido. - As respostas contêm elementos diferentes daqueles presentes nas respostas apresentadas aos eventos até então observados, ou seja, as respostas se distanciam daqueles presentes no item a da referida questão, de modo a não preservar a categoria (Ax, $x = 1, 2, 3, 4$ e 5) desta última.

B3	- Não aconteceria a mesma coisa: a coluna do líquido desceria. - As respostas contêm os mesmos argumentos e construções que as respostas dadas aos eventos até então observados, ou seja, respostas semelhantes ou basicamente iguais ao item a (da mesma questão) das referidas questões, preservando assim sua categoria (A_x, $x = 1, 2, 3, 4$ e 5) intacta.
----	---

Para o caso hipotético onde é proposto que tanto o fenômeno realizado com a vela [resistência] já estivesse acesa [ligada] dentro do recipiente de vidro, temos os resultados mostrados na Figura 4.3:

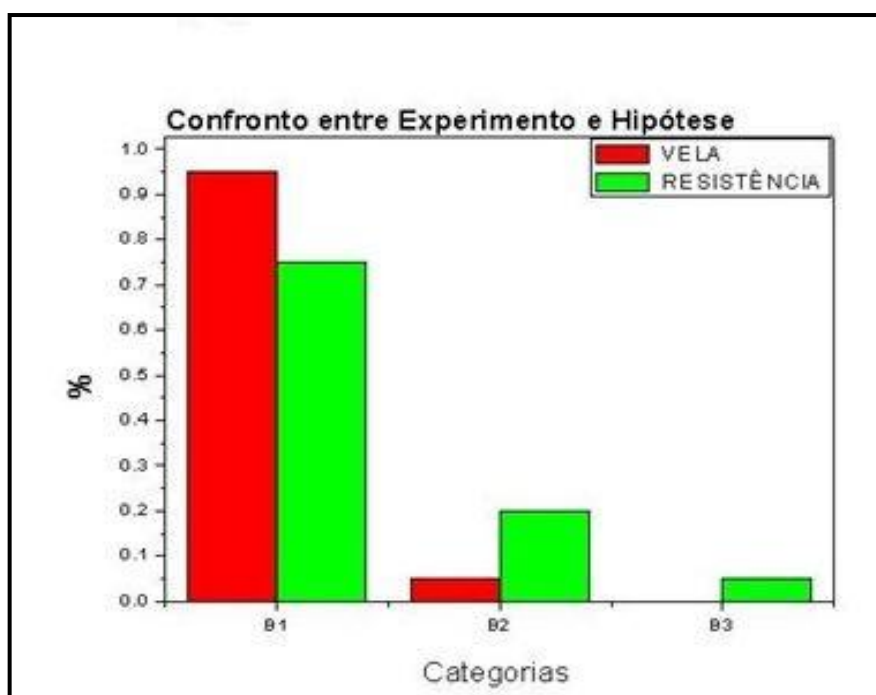


Figura 4.3: Hipóteses dos estudantes para a configuração experimental quando a vela [resistência] fosse acesa [ligada] já dentro do vasilhame de vidro após a realização do experimento com a vela/resistência fora do recipiente de vidro.

De acordo com a Fig. 4.3, para o “Experimento realizado com a vela”, 100% dos estudantes (soma das categorias B1 e B2 – coluna vermelha) corroboram da hipótese de que, assim como no item (a) da primeira questão (Q1a), uma coluna do líquido se elevará no recipiente de vidro quando a vela for acesa já dentro do recipiente. Ainda em relação ao fenômeno proposto com a vela (questão Q1b), 95% desses estudantes justificam a sua

hipótese da mesma forma que explicam o fenômeno na questão Q1a. Dito de outra forma, para 95% dos estudantes, as mesmas categorias (modelos mentais) identificadas em Q1a são utilizadas para se construir as hipóteses da questão Q1b.

Em se tratando do “Experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro”, 95% (soma das categorias B1 e B2 – coluna verde) afirmam que, assim como no item (a) da segunda questão (Q2a), uma coluna do líquido se elevará no recipiente de vidro quando a resistência for ligada já dentro do recipiente de vidro (ver Fig. 4.3). Contudo, o percentual de estudantes que mantém a categorização no item (b) da mesma questão (Q2b) altera-se. Neste caso, 75% permanecem com o mesmo modelo explicativo (mesma categoria) enquanto que 20% mudam o modelo. Acreditamos que tal acontecimento deva-se, novamente, à ausência de “queima do oxigênio” uma vez que, conforme visto na Fig. 4.1b, grande parte dos estudantes (35%) migram para a categoria A1 (mera descrição de observáveis) quando troca-se a vela pela resistência. Mencionado de outra maneira, a ausência de um modelo (mental) eficiente que abranja a mesma “espécie” de fenômeno, em suas diferentes formas de apresentação, fica caracterizado pelas constantes mudanças na forma de explicação.

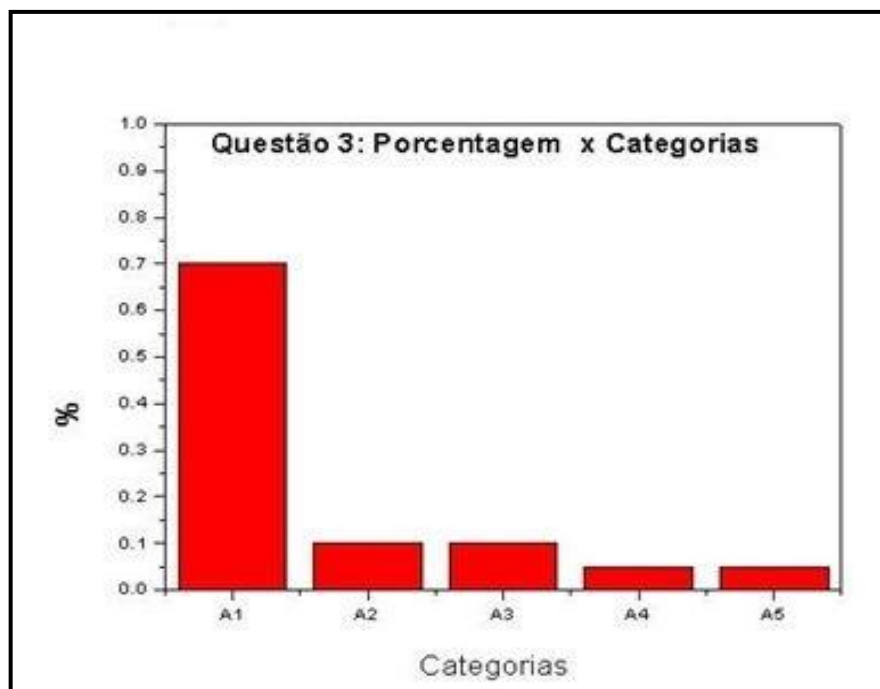


Figura 4.4: Porcentagem das categorias após ligar a resistência dentro do recipiente de vidro.

A ineficiência dos modelos alternativos fica ainda mais evidente Figura (4.4), diante da atividade experimental que poderia ou não corroborar a hipótese dos estudantes solicitadas na questão Q2b. Neste caso temos um aumento considerável na categoria A1, a saber, mera descrição dos fatos observáveis. Este comportamento deve-se a não corroboração (ver Fig. 4.3 – coluna verde), por parte do experimento, das hipóteses dos estudantes levando-os a um “abandono” de explicações baseadas em não-observáveis. O conflito entre a hipótese e o experimento é, ao nosso ver, o gerador do “conflito cognitivo”. Dito de outra forma, dado que nenhum modelo explicativo alternativo foi capaz de prever, de forma correta, o que aconteceria em um arranjo diferente, fica evidente o abandono dessas estruturas (modelos mentais) em detrimento da mera descrição do fenômeno, conforme o exemplo a seguir: “O nível diminuiu” (Q3, E.15). Outro exemplo relevante foi: “Bem, após ligar a resistência o líquido volta para o seu estado inicial” (Q3, E.20). Este fato – migração de outras categorias para a categoria A1 – que na ausência de confrontação entre hipótese/experimento (ver Fig. 4.2) já era evidente agora (Fig. 4.4) torna-se quase que exclusivo.

6 POSSÍVEIS COLABORAÇÕES DO TRABALHO EM SALA DE AULA

Os fenômenos apresentados aqui tem uma grande abrangência em sala de aula, tendo em vista que podem ser facilmente encaixados em uma aula de Ciências, Física, Química e outros. Os conceitos trabalhados em termodinâmica vão desde: equilíbrio térmico, temperatura, calor, combustão, primeira lei da termodinâmica, Lei dos gases ideais, dentre outros. São muitos os casos em que podemos citar o uso desses conceitos em turmas que vão desde o 9º ano passando pelo Ensino Médio e indo mais além, chegando a turmas de nível superior. Assim, dentro de uma proposta investigativa, atividades experimentais podem ser utilizadas em vários contextos, a saber, desde uma mera demonstração – em caráter introdutório – de um fenômeno até a possível utilização de conceitos de termodinâmica para se resolver um problema prático. De forma sucinta uma atividade experimental (incluindo a do presente trabalho) pode ser utilizada como:

6.1 Demonstração investigativa

As demonstrações investigativas vão além de ilustrar uma teoria desde que envolva uma investigação acerca do fenômeno investigado. Pois, demonstrações experimentais investigativas são demonstrações que dão início de uma apresentação de um problema voltado ao fenômeno a ser estudado e sugeri ao estudante uma reflexão diante desse fenômeno, possibilitando um ambiente investigativo a essa atividade. No nosso caso pode-se utilizar a demonstração investigativa com o “experimento realizado com resistência elétrica de chuveiro” antes de ministrar um conceito voltado a termodinâmica ou um modulo específico sobre o mesmo assunto. Empregando a questão 2 do item (b) em confronto com o fenômeno observado (questão 3), irá ficar evidente as concepções espontâneas dos alunos e gerar possíveis conflitos cognitivos nos mesmos. Logo depois, podemos levar os alunos aos conceitos termodinâmicos que queremos ministrar em sala de aula por meio de um debate entre os alunos.

6.2 Questões abertas

São questões em que buscamos sugerir para os estudantes fatos voltados ao seu dia a dia, problematizados, e cuja explanação estivesse junto ao conceito referido e construído nas aulas anteriores. Nessas questões, buscamos mostrar situações que permitam a participação do aluno e possam fortalecer não só sua capacidade de reflexão, organização do pensamento, mas também o uso da linguagem científica de forma adequada. Utilizaríamos as questões abertas em junção com os aparatos experimentais, de forma que poderíamos proporcionar aos alunos que os mesmos dessem previsões sobre os fenômenos investigados. Tendo por base, ressaltar conteúdos tratados anteriormente em termodinâmica trabalhando com os alunos em grupos.

6.3 Laboratório aberto (ou semiaberto)

É quando se propõe uma investigação experimental por meio da qual se pretende que os educandos, em grupo, solucionem um problema. Por ser um problema para os alunos, o Laboratório Aberto não pode ter uma solução já conhecida, pois isso não seria caracterizado como um problema. Sua função não é testar o que os alunos já aprenderam nas aulas teóricas, mas, ao contrário, é leva-los a encontrar uma solução experimental, utilizando-se de outras linguagens da ciência como construir tabelas com dados experimentais, ou melhor, escolher variáveis, construir gráficos, ou melhor, procurar qual a estrutura matemática que relaciona essas variáveis. O laboratório aberto tem como objetivo completar a alfabetização científica dos estudantes. Um exemplo utilizando o “experimento realizado com a resistência elétrica de chuveiro” seria: descubra se o processo envolvendo o experimento é isobárico ou não. Abaixo está uma comparação entre a Demonstração Investigativa, Questão Aberta e Laboratório Aberto.

Quadro 1: Comparação entre as atividades.			
Proposta	Momento (antes/depois)	Finalidade	Grau de Matematização
Demonstração	Antes do conteúdo	Verificar o	Não há necessidade

Investigativa		conhecimento prévio, introduzir o conteúdo através de um fenômeno, conflito cognitivo, etc...	
Questão Aberta	Depois do conteúdo	Verificar se houve mudança conceitual	Não há necessidade
Lab. Aberto	Depois do conteúdo	“Aplicação prática dos conceitos estudados (ampliação dos campos conceituais).	Há Obrigatoriedade

Mais colaborações do projeto em sala de aula. Se proporcionarmos a junção dos experimentos com a avaliação da aprendizagem, seríamos capazes de empregarmos os fenômenos nos 2 tipos de avaliação (diagnostica e formativa).

6.4 Avaliação diagnóstica

Este tipo de avaliação não possui como característica a de vir a atribuir uma nota ao aluno, e sim diagnosticar os conhecimentos prévios que os educandos já possuem. Então, com o diagnostico realizado pelo professor, o mesmo consecutivamente poderá propor técnicas para diminuir as defasagens apresentadas na aprendizagem. Devemos empregar este modelo de avaliação sempre que um novo procedimento de ensino e aprendizagem é incorporado na pratica de sala de aula, para dar um direcionamento na prática pedagógica. Kirnev e Fernandes (2015, p. 35) afirmam que para Hadji, essa modalidade avaliativa:

[...] identifica certas características do aprendiz e faz um balanço, certamente mais ou menos aprofundado, de seus pontos fortes e fracos. A avaliação [...] tem a função de permitir um ajuste recíproco aprendiz/programa de estudos (seja pela modificação do programa, que será adaptado aos aprendizes, seja pela orientação dos aprendizes para subsistemas de formação mais adaptados a seus conhecimentos e competências atuais). (HADJI, 2001, p.19).

Haja vista, podemos empregar os fenômenos antes de um conteúdo ou mesmo anteriormente ao um módulo específico. Logo, quando o professor levantar as questões respondidas pelos alunos vai se embasar em alguma proposta pedagógica para sanar as possíveis dificuldades encontradas.

6.5 Avaliação formativa

No que se refere à avaliação formativa, esta é procedimental e continuada. Seu propósito é investigar o ponto de vista qualitativo e não quantitativo, mostrando ao professor a ocasião de propiciar modificações na proposta de ensino a curto, médio e longo prazo. Tendo em posse seus dados é capaz estabelecer objetivos de ensino para efetuar diferentes métodos de trabalho para o processo de ensino e aprendizagem. Ao professor é viabilizado avaliar seu próprio desempenho e por meio das consequências guiar as direções a serem tomadas para uma melhoria na aprendizagem do educando. Para esse modelo de avaliação, o aluno pode seguir seu próprio curso de fabricação do conhecimento (possibilitando o mesmo possíveis acertos em sua educação). Para Kirnev e Fernandes (2015, p. 35), Hadji diz que esta é uma avaliação reguladora, à medida que possibilita mudanças no processo.

[...] o professor, que será informado dos efeitos reais de seu trabalho pedagógico poderá regular sua ação a partir disso. O aluno, que não somente saberá onde anda, mas poderá tomar consciência das dificuldades que encontra e torna-se-á capaz, na melhor das hipóteses, de reconhecer e corrigir ele próprio os seus erros. (HADJI, 2001, p. 20).

Portanto, os experimentos podem ser utilizados no meio do conteúdo ministrado ou no fim do mesmo, assim sendo, o professor conseguiu fazer uma reflexão a respeito do aproveitamento escolar. Tendo em conta, que os alunos também param e observam sua caminhada e observam aonde tem que melhorar para se encaixar na melhoria de sua performance educativa.

CONCLUSÕES

Foi satisfatório os resultados apurados, pois ficou nítido repararmos que na transição para o estudante responder a 1ª questão do item (a) e, logo em seguida, responder a 1ª questão do item (b) apresentou-se dificuldades realcionadas com o conhecimento prévio do aluno. Visto que, os estudantes ao tentar fazer a transição de um acontecimento vivenciado para outro supostamente divergente se depararam com problemas ao tentar explicar o conceito empregado e, com isso, percebemos a importância de uma proposta investigativa que levasse o aluno a pensar com base em suas concepções espontâneas.

Outro ponto bastante importante, foi a transição ocorrida entre o primeiro experimento e o segundo. Tendo em vista, que quando os participantes saíram do 1º fenômeno (experimento realizado com a vela) e partiram para o segundo (experimento realizado com resistência elétrica de chuveiro), conseguiu-se gerar os tão citados “**conflitos cognitivos**”. Logo, era um fenômeno novo para os alunos e os próprios não sabiam o motivo de estar acontecendo tal ocorrido. Notamos que o mesmo processo acontece ao analisarmos a 2ª questão do item (a) e do item (b), pois os participantes quando fazem a mudança acham que vai acontecer o mesmo efeito visto anteriormente em Q2a.

Todavia, o observado no experimento que é voltado a 3ª questão é o efeito contrário a 2ª questão da alternativa (a) e percebemos mais uma vez os conflitos cognitivos em ação, pois a maioria dos participantes responderam que iria acontecer a mesma situação em Q2b e Q2a. Dito de outra maneira, quando o aluno se depara com o acontecimento hipotético e, logo em seguida é confrontado com o mesmo fenômeno na Q3 (acontecimento observado). Com isso, podemos mostrar que sua estrutura cognitiva não lhe dar suporte para explicar o experimento no caso hipotético e tão pouco no acontecimento real (Q3). Com isso, fica evidente a ineficiência dos modelos alternativos apresentados pelos estudantes ao tentarem responder o mesmo fenômeno sendo apresentado de forma diferente. Pois, fica demonstrado pelas constantes alterações na sua forma de explicação.

Visto que a proposta investigativa serviu neste trabalho para perceber as concepções espontâneas e produzir os conflitos cognitivos, mas podem ser utilizados como organizadores prévios. Pois, uma proposta investigativa antes de um conteúdo/módulo pode servir como ancoradouro provisório para o novo conteúdo que vai ser ministrado pelo professor em sala de

aula. Contudo, devemos ressaltar que o método apresentado não vai sanar todas as dificuldades vivenciadas pela educação no nosso país, mas propõe subsídios para uma mudança no método de ensino. Haja vista, que o ensino no Brasil ainda está cada vez mais em esquecimento e uma possível melhoria seria o sonho de muitos.

REFERÊNCIAS

ATKINS, P; PAULA, P. de; Físico-Química: Volume 1. 9ª ed. Rio de Janeiro: GEN/LTC. 2012.

BROWN, T. L.; et al; Química: **a ciência central**. 13ª ed. São Paulo: Pearson. 2016

CARVALHO, A. M. P. de; **Calor e Temperatura**: um ensino por investigação. 1. Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2014.

CARVALHO, A. M. P. de; et al; **Ensino de Ciências**: Unindo a Pesquisa e a Prática. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda. 2004.

CHAVES, A.; Sistemas Complexos e Outras Fronteiras: Volume 4. Rio de Janeiro: Reichamann & Affonso Ed. 2001.

CONHECIMENTO – Ondas Eletromagnéticas: A Geração de Ondas Eletromagnéticas, 2011. [Internet] Disponível em: <<http://escola-conhecimento.blogspot.com/2011/04/ondas-eletromagneticas.html>>. Acesso em: 11/05/2011.

ELETROCPEÇAS - Fonte de Alimentação Digital Assimétrica Minipa MPL (1303M), 2017. [Internet] Disponível em: <<https://www.eleropecas.com/Produto/fonte-de-alimentacao-digital-assimettrica-minipa-mpl-1303m>>. Acesso em: 11/05/2018

FERNANDES, R. K.; KIRNEV, D. C. B.; **METODOLOGIA DO ENSINO DA MATEMATICA**. Londrina, PR. Editora e Distribuidora Educacional S. A. 2015.

HEWITT, P. G.; Física Conceitual. 12ª ed. Porto Alegre: Bookman. 2015.

NUSSENZVEIG, H. M.; Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 4ª ed. São Paulo: Editora Blucher. 2008

MOREIRA, M. A.; **Aprendizagem Significativa**: teoria e textos complementares. 1. Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2011.

MUNDO EDUCAÇÃO – Dilatação Linear, 2018. [Internet] Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/dilatacao-linear.htm>>. Acesso em: 11/05/2018.

PREZI – David Paul Ausubel, 2018. [Internet] Disponível em: <<https://prezi.com/0mgjnyewqqz/david-paul-ausubel-nasceu-em-25101918-e-morreu-em-090720/>>. Acesso em 11/05/2018

Teoria da Aprendizagem Significativa de David Paul Ausubel. Prof. Cesar Pinheiro. **Youtube**. 9 ago. 2016. 1h13min51s. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Kaz5PTY0CF0>>. Acesso em: 11/05/2018.

TERMODINÂMICA 1 – Temperatura e equilíbrio térmico, 2004. [Internet] Disponível em: <<http://def.fe.up.pt/fisica3/termodinamica1/index.html>>. Acesso em: 11/05/2018.

TERMODINÂMICA 1 – Teoria cinética dos gases, 2004. [Internet] Disponível em: <<http://def.fe.up.pt/fisica3/termodinamica1/index.html>>. Acesso em: 11/05/2018.

TIPLER. P. A.; MOSCA, G.; FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS: VOLUME 1 (Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica). 6ª ed. Rio de Janeiro: GEM/LTC. 2009.

SLIDEPLAYER – Lei de Avogadro: Relação Quantidade-Volume, 2018. [Internet] Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/4025505/>>. Acesso em: 11/05/2018.

SLIDEPLAYER – Propriedades dos Gases: Gases Reais, 2018. [Internet] Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/45965/>>. Acesso em: 11/05/2018.

SLIDEPLAYER – Propriedades dos Gases: Lei de Charles, 2018. [Internet] Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/45965/>>. Acesso em: 11/05/2018.

SLIDEPLAYER – Propriedades dos Gases: Lei de Boyle, 2018. [Internet] Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/45965/>>. Acesso em: 11/05/2018.

SLIDEPLAYER – Sistema Hidráulicos, 2018. [Internet] Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/44383/>>. Acesso em: 11/05/2018.

VIVA DECORA - Faça Você Mesmo: Como Trocar a Resistência do Chuveiro, 2017. [Internet] Disponível em: <<https://www.vivadecora.com.br/revista/ideias-criativas-diy/como-fazer-laco-de-natal-passo-a-passo/>>. Acesso em: 11/05/2018.

APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO SOBRE O EXPERIMENTO DA VELA

1) No experimento você viu que após tampar a vela com o copo, fazendo o recipiente de vidro encostar no líquido a vela chega a apagar e sobe uma coluna de líquido no copo.

a) Em sua opinião por que isso acontece? Explique o processo com o máximo de detalhes possível.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

b) Se a vela pudesse ser acesa já dentro do copo, com o recipiente de vidro fazendo contato com o líquido, em sua opinião o que aconteceria? Justifique sua resposta.

[illegible]

2) No experimento você viu que após tampar a resistência com o copo, fazendo o recipiente de vidro encostar na água e em seguida desligar a energia elétrica que passa pela resistência, sobe uma coluna de líquido.

a) Em sua opinião por que isso acontece? Explicar o processo com o máximo de detalhes possível.

This image shows a full page of white paper with horizontal black lines, resembling notebook paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

b) Se a resistência pudesse ser ligada já dentro do copo, com o recipiente de vidro fazendo contato com o líquido, em sua opinião o que aconteceria? Justifique sua resposta.

[illegible]

3) No experimento você viu que a resistência está tampada com o copo, fazendo o recipiente de vidro encostar no líquido e em seguida ligar a energia elétrica que passa pela resistência, sobe uma coluna de líquido na parte externa do copo. Em sua opinião por que isso acontece? Explicar o processo com o máximo de detalhes possível.

[illegible]

APÊNDICE B – MATERIAIS UTILIZADOS PARA CONFECCIONAR OS EXPERIMENTOS

1 – Duas garrafas de vidro de 1 L;

Dimensões da garrafa de 1 L: altura = 30.0 cm, diâmetro = 8.0 cm e espessura = 0,2 cm

2 – Uma resistência elétrica de chuveiro;

Grandezas envolvidas: tensão = 220 V , Potência = 5.500 W ou mais potente



Figura 1.1: Resistência elétrica de chuveiro.

3 – Uma caixa de vela de parafina e pavio;

4 – Uma caixa de fósforos;

5 – Corante na cor vermelha;

6 – Um saquinho de rolhas que tampam a garrafa de 1 L;

7 – Uma bacia plástica;

Dimensões da bacia plástica: comprimento = 23.0 cm, largura = 6.0 cm, altura = 6.0 cm



Figura 1.2: Bacia de plástico.

8 – Um cabo elétrico flexível;

Dimensão do cabo elétrico flexível: diâmetro = 2.5 mm, comprimento = 8.0 m

9 – Fonte de alimentação digital;

Entrada: tensão = 220 V e frequência = 60 Hz

Saída: tensão = 0 ~ 32 V e corrente = 0 ~ 3 A



Figura 1.3: Fonte de alimentação digital.

10 – Pistola e cola quente;

11 – Alicate universal;

12 – 500 ml de água;

13 – Um interruptor simples;

Dimensões: tensão = 220 V e corrente = 10 A

14 – Uma porca de encaixar no parafuso;

Dimensões: diâmetro = 2,4 cm, altura = 1,4 cm e raio interno = 1,4 cm

15 – Estilete;

APÊNDICE C – GUIA PRÁTICO DE CONSTRUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Com os materiais descritos na seção anterior, vamos partir para a confecção e realização dos experimentos. Logo, para o 1º Passo: Corte a primeira garrafa de vidro (1L), a separação deve ser realizada do fundo da garrafa para cima uma medida de 2.0 cm (como é ilustrado na Fig. 1.1);



Figura 1.1: Garrafa do primeiro passo.

2º Passo: Corte a segunda garrafa de 1L, realize a separação do início do gargalo até a medida de 9.0 cm (como ilustrado na Fig. 1.2);



Figura 1.2: Garrafa do segundo passo.

3º Passo: Corte 3 rolhas ao meio (Fig. 1.3) e utilize a parte da rolha com o diâmetro maior para fazer uma base para a garrafa do 1º Passo. Com a parte do diâmetro menor da rolha em mãos, faça o mesmo procedimento para a garrafa do 2º passo, logo em seguida realize uma fissura em cada base (Fig. 1.4) para servir de encaixe nas garrafas do 1º e 2º passo. Agora, cole a base na garrafa do 1º e 2º passo (Como é ilustrado na Fig. 1.5 e 1.6) de modo ao suporte ficar simétrico (a distância de uma base para outra deve ser equivalente). As Figuras 1.7 e 1.8 mostram as garras do 1º e 2º passo finalizadas.

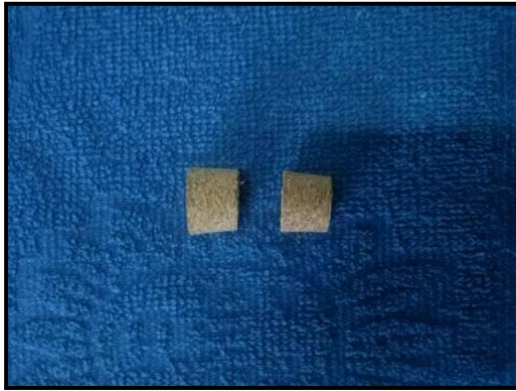


Figura 1.3: Rolha cortada ao meio.



Figura 1.4: Fissura empregada na base.



Figura 1.5: Colagem da base (1º Passo).



Figura 1.6: colagem da base (2º Passo).



Figura 1.7: Termino (1º Passo).



Figura 1.8: Termino (2º Passo).

4º Passo – Faça um furo longitudinal na rolha, pegue o cabo flexível e parta-o ao meio e em seguida faça-os passar pela rolha descrita anteriormente no 4º Passo. Consecutivamente, desencape as pontas dos fios e posteriormente você deve soldar os dois fios as extremidades da resistência com maior comprimento. Retire a resistência menor com um alicate universal (como ilustrado na Fig. 1.9).



Figura 1.9: Arranjo do experimento.

5º Passo – Passe o arranjo do experimento descrito no 4º passo por dentro da garrafa do 2º passo. Tampe a garrafa do 1º passo com uma rolha e em seguida escolha um dos dois fios do 4º passo para corta-lo ao meio. Com os fios cortados ao meio, desencape-os e insira os mesmos no interruptor (como ilustrado na Fig. 1.10).



Figura 1.10: Desenvolvimento do 5º passo.

6º Passo – Pegue uma vela e introduza a extremidade que não possui o pavio na porca. A porca vai servir como suporte para a vela (como ilustrado na Fig. 1.11).



Figura 1.11: Sustentação para a vela.

APÊNDICE D - ALGUNS CONCEITOS ENVOLVIDOS NA EXPERIMENTAÇÃO

O trabalho proposto possui vários conceitos que envolvem a Física, Química e diversos setores da Engenharia, logo dentre eles estão: a Pressão Atmosférica, a Propriedade dos Gases, a Dilatação Volumétrica, Condução de Calor, Teoria Cinética, Gases Reais e outros. Iremos começar tratando um pouco sobre Pressão.

1 Pressão

Portanto, em nosso cotidiano o associado à pressão perpassa a noção de força, representando um solavanco (empurrão ou puxão) que tende a deslocar algo em uma determinada direção. No entanto, para o nosso caso, estamos falando sobre uma pressão exercida sobre um gás, sendo assim, o mesmo exerce pressão numa superfície com a qual esteja em contato. Levando em conta que na ciência, a pressão (P) é entendida como uma força (F) que atua sobre uma área (A) e sua equação é:

$$P = \frac{F}{A}. \quad (1.1)$$

Para ilustrar a diferença entre pressão e força, empregaremos os dois blocos da Figura 1.1: Os blocos são idênticos (pois possuem o mesmo peso), mas um deles se apoia sobre sua base circular, enquanto o outro é sustentado sobre uma extremidade pontiaguda. Haja vista, o bloco que está por cima da extremidade pontiaguda exerce uma pressão maior que a do outro bloco.

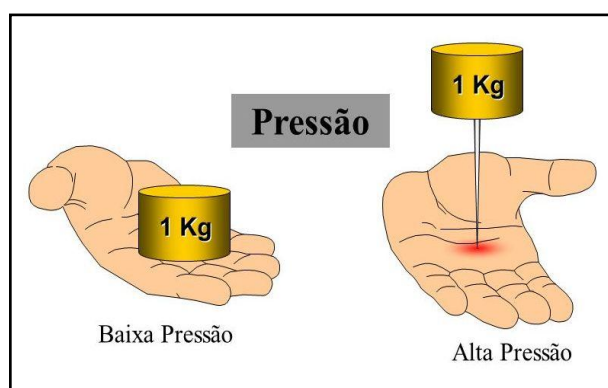


Figura 1.1: Demonstração da diferença entre pressão e força.

Pois bem, com uma breve descrição de pressão, passaremos a empregar esse conceito para tentar explicar a pressão atmosférica.

Pressão atmosférica

Logo, a terra exerce uma interação gravitacional para seu interior, e com isso, atrai todas as coisas que são constituídas de matéria. Portanto, essa força gravitacional faz cair uma laranja de uma laranjeira e a mesma é acelerada em direção a terra. Logo sua velocidade aumenta à proporção que sua energia potencial é convertida em energia cinética. Então o gás que constitui a atmosfera também sofre aceleração gravitacional, mas sua massa é relativamente pequena e sua energia cinética cancela a força gravitacional. De modo que as partículas que formam a atmosfera não se acumulam na superfície da terra, no entanto, a interação da terra ainda está presente e faz com que a atmosfera como um todo exerça uma pressão sobre a superfície terrestre. Consecutivamente, produzindo a Pressão Atmosférica, definida pelo peso do próprio ar que envolve a superfície da terra. Podemos calcular a Pressão Atmosférica da seguinte forma:

$$P_{\text{atm}} = \frac{\text{Peso do ar que envolve a superfície da terra}}{\text{área da superfície da terra}} = \frac{F}{A}. \quad (1.2)$$

Onde, a unidade de medida mais usual é o Pascal (N/m²). Já estabelecido os conceitos de Pressão e Pressão Atmosférica, iremos tratar agora do que seria a propriedade dos Gases. Porém, antes precisamos definir alguns conceitos importantes sobre temperatura e calor.

2 Temperatura

A ideia de temperatura no dia a dia está relacionada com a sensação térmica, mas essa aferição que fazemos com o nosso corpo varia de pessoa para pessoa e constitui ao erro da

verificação da mesma. E com isso ao tocarmos em um dia frio um objeto metálico e outro de madeira, logo temos a sensação que o objeto metálico está mais frio do que o outro. Porém os dois se encontram a mesma temperatura, contudo uma diferença bem plausível é que um deles é condutor (objeto de metal) e outro é isolante (madeira). Haja vista, o condutor está à temperatura mais baixa do que seu corpo e você perde energia térmica pelos seus dedos para o mesmo. Prontamente, você esquentar uma barra de cobre e põe em contato com uma barra de ferro a temperatura ambiente, de maneira que a barra de ferro se aquece e a barra de cobre se resfria. Logo, concluímos que as duas barras estão em **Contato Térmico** uma com a outra. Pois, a barra de cobre se contrai levemente ao ser resfriada e a barra de ferro se expande levemente ao ser aquecida. Quando este processo chega ao fim, os comprimentos das duas barras passam a ser permanentes. Então as duas barras estão em **Equilíbrio Térmico** entre si, em seguida esse fenômeno é descrito como a **Lei zero da Termodinâmica**. Para os autores Tipler e Mosca (2009, p. 572) a lei zero da termodinâmica é definida como: “Se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então os três corpos estão em equilíbrio térmico entre si” (Fig. 2.1).

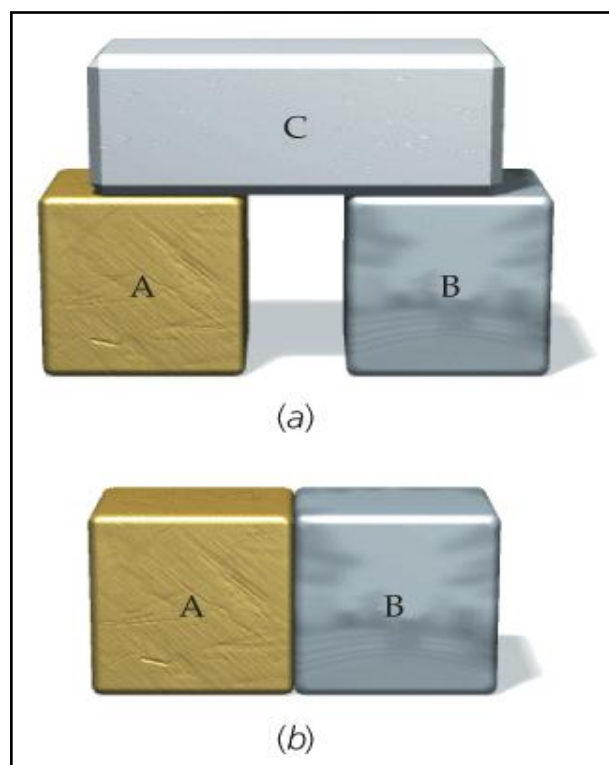


Figura 2.1: A lei zero da termodinâmica. (a) Os sistemas A e B estão em contato térmico com o sistema C, mas

não em contato entre si. Quando A e B atingem, cada um, o equilíbrio térmico com C, eles estão em equilíbrio térmico um com o outro, o que pode ser verificado colocando-os em contato, como na arte (b)

Tendo em vista, que o equilíbrio térmico entre dois corpos significa dizer que os dois estão à mesma temperatura. Esse seria um conceito formal de temperatura visto por uma “**visão macroscópica**” obtida em detrimento com a lei zero da termodinâmica. Paul Hewitt (2015, p.285) esclarece que temperatura é:

Toda matéria – sólida, líquida ou gasosa – é composta por átomos ou moléculas em constante agitação. Em virtude desse movimento aleatório, os átomos ou moléculas da matéria possuem energia cinética. A energia cinética média dessas partículas individuais produz um efeito que podemos sentir – a sensação de quente. A quantidade que informa quão quente ou frio é um objeto em relação a algum padrão é chamada de **temperatura**.

A explicação fornecida pelo autor do livro texto Física Conceitual referente ao conceito de temperatura, é visto como uma relação entre a energia interna do corpo e sua temperatura. Tendo em vista, é uma “**perspectiva microscópica**” do que seria a formulação do entendimento sobre a temperatura. Contudo, é relevante ressaltar que todos os corpos sofrem certa expansão, quando as temperaturas de seus corpos se elevam ou se contraem quando a temperatura diminui. Iremos falar um pouco sobre a **dilatação térmica** que é tão vivenciada no nosso cotidiano.

Dilatação térmica

Pois muitos fenômenos observados ao nosso redor utilizam o princípio da expansão térmica, assim sendo, esses acontecimentos vão desde: o uso de um termômetro clínico (o mercúrio se amplia no interior do mesmo), Os fios dos telefones (fazem-se mais longos e vergam-se mais em um dia de verão do que num dia de inverno), as tampas metálicas de potes de conserva (podem ser facilmente retirada, com o aquecimento sob água quente) e assim por diante. Paul Hewitt (2015, p.291) afirma que a expansão térmica acontece:

Quando a temperatura de uma substância aumenta, suas moléculas ou átomos passam, em média, a oscilar mais rapidamente e tendem a se afastar umas das outras. O resultado disso é uma dilatação da substância. Com poucas exceções, todas as formas de matéria – sólidas, líquidas, gasosas ou plasmas – normalmente se dilatam quando são aquecidas, e contraem-se quando resfriadas.

A dilatação dos materiais deve ser permitida em estruturas e dispositivos de todos os tipos. Um dentista usa materiais de obturações que possuem a mesma taxa de dilatação que os dentes. No entanto cada substância dilata-se com sua própria taxa específica, ou seja, cada material tem um **coeficiente de dilatação** que é intrínseco ao mesmo.

Coeficiente de dilatação

Começaremos introduzindo o conceito do coeficiente de dilatação linear e depois passaremos ao coeficiente de dilatação volumétrico. Portanto, O comprimento L de uma barra sólida sob tensão constante é função de sua temperatura, ou seja, $L = L(T)$. Com frequência, em ambas faixas de temperaturas o comprimento da barra modifica-se linearmente com a temperatura, assim sendo,

$$L = L_0 + \alpha L_0(T - T_0). \quad (2.1)$$

Onde L_0 é o comprimento à temperatura T_0 . Na equação (2.1), α é uma constante característica do material que compõe a barra, denominada **coeficiente de dilatação linear**. Sendo $\Delta T \equiv T - T_0$ e $\Delta L \equiv L - L_0$, podemos reescrever a equação (2.1) na forma:

$$\alpha = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta T}. \quad (2.2)$$

Em alguns cristais e polímeros, o coeficiente de dilatação linear pode ser **anisotrópico**, sendo assim, vem a depender da direção adotada. Tendo como exemplo, se aquecermos um cristal de quartzo observaremos que para qualquer comprimento tomado no referido corpo valerá uma relação como da eq. (2.1). Contudo, o valor de α será distinto para diferentes direções no cristal. Isto é consistente com o fato de que as propriedades dos cristais são em geral dependentes da direção. No entanto, se considerarmos um material com propriedades

isotrópicas, como uma barra de aço ou um pedaço de vidro, o coeficiente de dilatação linear será um escalar, ou melhor, terá o mesmo valor para todas as direções (Fig. 2.2).



Figura 2.2: Quando uma barra de aço é aquecida, todas as suas dimensões lineares são ampliadas na mesma proporção.

Demos uma breve passagem sobre dilatação linear, agora estamos prontos para nos formalizar com conceito voltado a expansão volumétrica. Logo, a alteração do volume de um corpo com a temperatura pode ser obtida a partir do conhecimento do seu coeficiente de dilatação linear. Para tornar mais simples, consideremos um cubo cujas arestas a T_0 tem comprimento L_0 . Nessa temperatura o cubo terá volume $V_0 = L_0^3$. À temperatura $T = T_0 + \Delta T$, o volume do corpo será;

$$V = [L_0(1 + \alpha\Delta T)]^3. \quad (2.3)$$

Uma vez que $\alpha\Delta T$ é um número muito pequeno, podemos fazer a aproximação

$$(1 + \alpha\Delta T)^3 = 1 + 3\alpha\Delta T, \quad (2.4)$$

e portanto a eq. (2.3) pode ser escrita na forma

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T. \quad (2.5)$$

Definindo o **coeficiente de dilatação volumétrica** $\beta \equiv 3\alpha$, e escrevendo $\Delta V \equiv V - V_0$, obtemos

$$B = \frac{\Delta V/V_0}{\Delta T}. \quad (2.6)$$

Outro fenômeno de expansão térmica no dia a dia seria o vidro pyrex. Pois sua dilatação é 3 vezes menor que os vidros comuns. Dessa forma, os vasilhames de cozinha que vão ao forno são produzidos de pyrex, e com isso, eles suportam maiores modificações de temperaturas entre suas diferentes partes sem se quebrarem. Uma analogia ao efeito voltado a dilatação volumétrica, pode ser observada no balão a ar quente. Haja vista, o gás dentro do balão (envelope) se dilata ao momento que é aquecido e fica menos denso do que o gás encontrado no exterior do balão. Portanto, o balão é mais leve que o gás que o rodeia na parte externa e o mesmo vêm a sofrer a ação de um empuxo ascendente (o balão tende a subir). Já aprendemos sobre temperatura e expansão térmica, posto isto, vamos adentrar no conceito referente a calor e suas formas de transporte.

3 Calor e seus mecanismos de transferência

Quando você toca numa estufa aquecida, a energia se transfere para sua mão, porque a estufa está mais quente do que a mesma. De outro ponto de vista, quando você encosta sua mão em cubinhos de gelo retirados da geladeira, a energia sai de sua mão para o gelo, que é mais frio. O sentido da transferência de energia é sempre espontâneo e tende a se transportar do corpo que esta mais quente para um vizinho mais frio. Para Paul Hewitt (2015, p.287) “A energia transferida de uma coisa para outra por causa de uma diferença de temperatura entre elas é chamada de **calor**”. É considerável ressaltar que a matéria não contém calor. Logo, isso foi descoberto por **Rumford** em seus experimentos realizados com canhões. Rumford, e pesquisadores que seguiram suas pesquisas, perceberam que a matéria contém energia cinética molecular e supostamente energia potencial, **não calor**. **Calor** é um fluxo de energia de um corpo a uma temperatura mais alta para outro a uma temperatura mais baixa. Uma vez transmutada, a energia deixa de ser calor. Como comparação, o **trabalho** também é **energia em transito**. Um corpo não contém trabalho. Ele realiza trabalho ou trabalho é realizado sobre ele.

Então, a soma total de todas as energias no interior de uma substancia é designada de **energia interna**. Além da energia cinética de translação da agitação molecular em uma

substância, encontra-se também a energia em outras formas. Portanto, existe a energia cinética rotacional das moléculas e a energia cinética devido ao movimento interno dos átomos dentro das moléculas. Há também a energia potencial devido às forças entre as moléculas. De maneira que uma substância não contém calor e sim energia interna, ou seja, no momento em que uma substância absorve ou cede calor, a sua energia interna, proporcionalmente, aumenta ou diminui. Em algumas situações, em que o gelo se derrete, o calor absorvido de fato não aumenta a energia cinética molecular, mas transforma-se em outras formas de energia. Neste exemplo, a matéria sofre uma mudança de fase (intitulada fusão).

De fato, tentamos explicar o que é o calor, logo sabemos que é a transferência de energia de um corpo mais quente para um mais frio. No entanto, precisamos definir as formas como é realizada essa transmutação de energia. Haja vista, existem três tipos básicos de transmissão de calor que são: a **condução**, a **convecção** e a **radiação**.

Condução

Imagine que você esteja assando milho na ponta de um espeto (feito de ferro), sobre uma fogueira de festa junina. Enquanto você espera tostar a superfície do milho, o espeto vai se tornando quente. Portanto, se não tivesse um apoio de madeira na extremidade oposta onde está o milho, logo você se queimaria. O calor entra no espeto pela ponta mantida na chama, e se transmite ao longo da haste até chegar ao cabo de madeira. Esse modo de transmissão de calor é chamado de **condução**. O fogo faz os átomos da extremidade aquecida deslocarem-se cada vez mais rapidamente. Por conseguinte, esses átomos e elétrons livres colidem com seus vizinhos e assim por diante. Logo, os elétrons livres são capazes de se mover dentro do metal, e com isso, são chacoalhados e transferem energia para o material por meio de colisões com os átomos e outros elétrons livres do mesmo. Em vista disso um metal ou qualquer objeto sólido conduz bem o calor, dessa forma depende apenas das ligações em sua estrutura atômica ou molecular. Os sólidos compostos por átomos com um ou mais de seus elétrons mais externos “**fracamente**” ligados, são bons condutores de calor (e de eletricidade).

A prata é o melhor condutor de todos, seguido do cobre e, entre os metais comuns, o alumínio e depois o ferro são os próximos na ordem seguida (decrecente). Lã, madeira, canudo, papel, cortiça e isopor, por outro lado, são condutores de calor pobres. Os elétrons mais externos dos átomos desses materiais estão “**firmente**” ligados. Os maus condutores são denominados **isolantes**. Lã, madeira, palha, papel, cortiça e isopor são bons isolantes

térmicos. Por esse motivo, que você pega no apoio do espeto sem se queimar. Pois, a madeira lhe protege contra a condução do calor. Iremos tratar agora da convecção, que é bem comum na realidade que nos cerca.

Convecção

Pois os fluidos transmitem calor principalmente por **convecção**, que é o transporte de calor devido ao próprio movimento do fluido. Desigualmente da condução (em que o calor é fornecido por meio de sucessivas colisões de átomos e de elétrons), a convecção envolve o movimento de “**bolhas**” de matéria – oriundo do movimento médio das moléculas de um fluido. Se aquecermos a água em uma panela, o processo é o mesmo (Fig. 3.1).



Figura 3.1: Correntes de convecção em um líquido.

Quando o fluido é esquentado por baixo na panela, as moléculas do líquido que estão no fundo passam a mover-se mais rapidamente, afastando-se, em média, mais umas das outras, tornando menos denso o material, de modo que surge uma força de empuxo que empurra o fluido para cima. O fluido mais frio e mais denso, então, move-se de modo a ocupar o lugar do fluido mais quente no fundo da vasilha. Dessa maneira, as correntes de convecção conservam o fluido em circulação enquanto ele se abrasa. E com isso, o fluido mais aquecido afasta-se da fonte de calor e o fluido mais frio move-se em direção a fonte de calor. Na Fig. 3.1, se analisarmos bem, está ocorrendo uma boa aplicação da condução térmica por meio da chama em contato com a peça de metal. Falamos sobre condução e convecção, mas agora vamos nos familiarizar com a transmissão de energia conhecida como radiação.

Radiação

O calor que recebemos do Sol perpassa o espaço, em seguida a atmosfera terrestre para, depois, aquecer a superfície da Terra. Essa energia não passa através da atmosfera por condução, pois o ar é um bom isolante térmico (como foi visto anteriormente). Todavia, ela também não penetra por convecção, pois esta só tem início quando a Terra já está aquecida. Logo, também sabemos que no espaço vazio entre nossa atmosfera e o Sol não é possível haver transmissão da energia solar por convecção ou condução. Assim, vemos que a energia fornecida pelo sol deve ser transmitida de outra maneira. Portanto essa forma de transmutação de energia é conhecida como **energia radiante**, logo a mesma está na forma de **ondas eletromagnéticas**. Consequentemente abrange as ondas de rádio, as micro-ondas, a radiação infravermelha a luz visível, a radiação ultravioleta, os raios X e os raios gama.

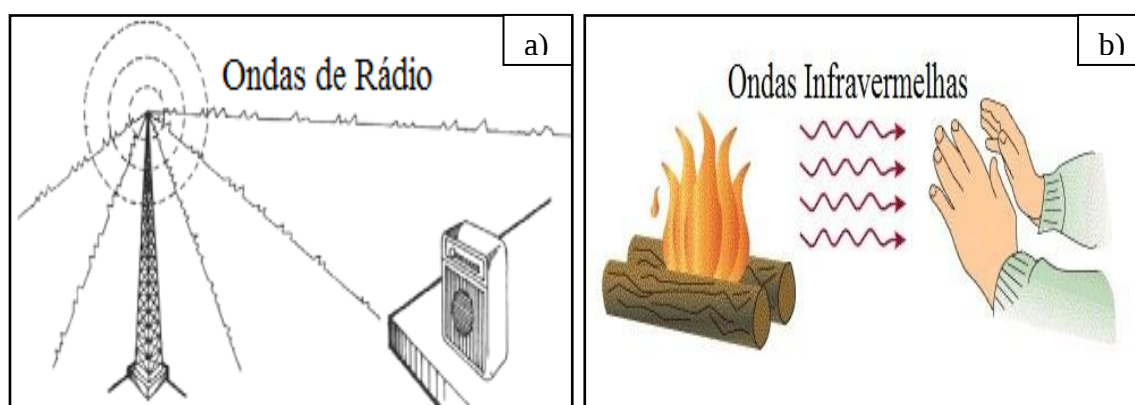


Figura 3.2: Duas formas distintas de comprimentos de onda - (a) Ondas de rádio e (b) Ondas infravermelhas.

As ondas eletromagnéticas podem ser diferenciadas pelo seu comprimento de onda e sua frequência (É a taxa de vibração de uma onda). A radiação infravermelha (abaixo do vermelho) tem um comprimento de onda mais longo do que o da luz visível. Os mais longos comprimentos de onda visíveis são os da luz vermelha e os mais curtos são os da luz violeta. A radiação ultravioleta (além do violeta) tem comprimentos de onda mais curtos ainda. Enfim, entraremos nesse exato momento ao conteúdo que começamos a enfatizar na abertura desse capítulo (referente à propriedade dos gases).

4 Propriedade dos gases

Portanto, um estado mais simples da matéria é um gás, ou seja, é um aglomerado de moléculas em movimento permanente e aleatório, com velocidades médias que crescem quando a temperatura se eleva. No entanto, o gás é diferente de um líquido pelo modo das moléculas se encontrarem muito afastadas, exceto no instante das colisões, e que se movimentam em trajetórias que são muito pouco perturbadas pelas forças intermoleculares. Contudo, o gás e o líquido são denominados como **fluidos**. Mas, afinal o que poderia ser um fluido? O fluido é um modelo da matéria que ocupa qualquer recipiente que o mantém. E com isso, realizam força nas extremidades do recipiente que os contém (resultados de inúmeras colisões entre as moléculas e as paredes do frasco). Haja vista, que os gases possuem sua equação de estado, pois se considerarmos um gás puro, por exemplo, o mesmo terá volume (V), número de moles (n), pressão (P) e temperatura (T). Porém, basta saber três das variáveis para que a quarta seja definida, este fato foi comprovado empiricamente. A forma geral de uma equação de estado é dada por:

$$P = f(T, V, n). \quad (4.1)$$

Aonde, a pressão (P) é obtida em função da temperatura (T), Volume (V) e número de moles (n). A equação de estado assume uma forma simples para um **gás ideal** (também chamado de **gás perfeito**). Conforme o próprio nome está dizendo, trata-se de uma idealização de um gás real, no limite de rarefação extrema. Quanto mais distante a temperatura do gás em relação a seu ponto de liquefação e quanto menor a pressão, mais ele se aproxima do comportamento de um gás ideal. Na prática trata-se de uma excelente aproximação na maioria dos casos. Vamos adentrar neste solene instante nas leis experimentais que resultaram na equação de estado do gás ideal: **Lei de Boyle**, **Lei de Charles** e **Lei de Avogadro**.

Lei de Boyle

Em 1662, o físico inglês Robert Boyle (1627-1691) publicou um livro denominado “A Mola do Ar”, contendo uma nova lei relativa à elasticidade do ar, assim sendo, relacionando sua pressão com o seu volume. Logo, as propriedades de amostras de gás que possuem pequena massa específica levam a definição da escala de temperatura de gás ideal. Então, se comprimirmos tal gás mantendo sua temperatura constante (em um processo termodinâmico que a sua temperatura não se modifica, chama-se **isotérmico**), a sua pressão aumenta. De modo análogo, se um gás se dilata isotermicamente, sua pressão diminui. Com boa proximidade, o produto da pressão pelo volume de uma amostra de gás de pequena massa específica é uma constante. Logo, este resultado experimental ficou conhecido com a **Lei de Boyle**:

$$P = \frac{1}{V} \times \text{constante ou } PV = \text{constante.} \quad (4.2)$$

A Figura 4.1(a) mostra a mudança da pressão de uma amostra de gás quando o volume se altera. Cada curva do gráfico corresponde a uma única temperatura e é chamada de **isoterma** (de acordo com a lei de Boyle, as isotermas são **hipérboles**). Outra representação, um gráfico da pressão contra 1/volume, aparece na Fig. 4.1(b).

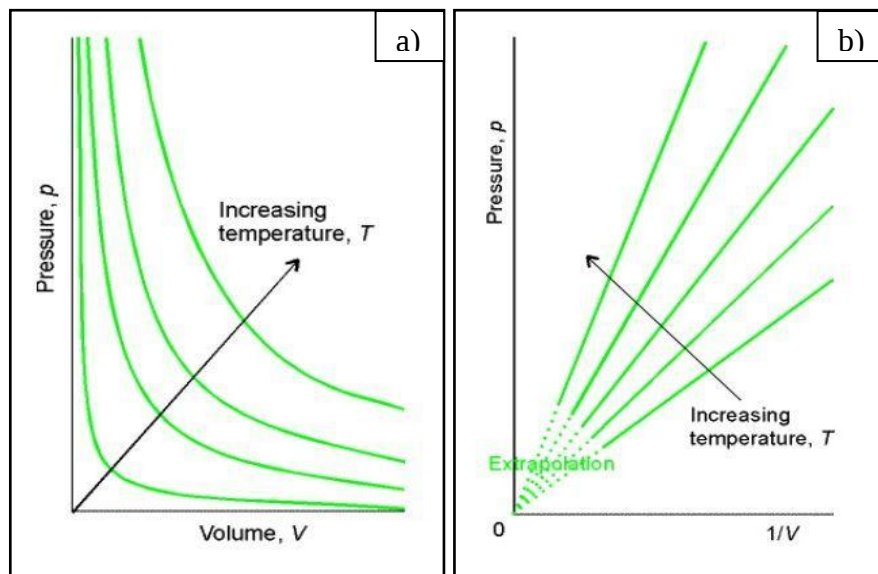


Figura: 4.1: (a) Observamos a dependência entre a pressão e o volume de uma quantidade constante de gás perfeito, em diferentes temperaturas. Cada curva é uma hipérbole ($PV = \text{constante}$) e é chamada de isoterma. (b) Logo, obtêm-se retas quando se representa a pressão contra $1/V$ a uma temperatura constante.

Portanto, se observarmos ao gráfico da Figura 4.1(a) e a equação (4.2) podemos notar que as grandezas são **inversamente proporcionais**, ou seja, quando uma medida aumenta a outra diminui.

Lei de Charles

Em 1787, o físico francês Jacques Charles (1746-1823) observou que a temperatura absoluta de uma amostra de um gás de pequena massa específica é proporcional ao seu volume, quando a pressão é mantida fixa (em um fenômeno termodinâmico que a sua pressão não se altera, designa-se **isobárico**). Esse resultado ficou conhecido como a **Lei de Charles**, contudo em 1802 Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) também chegou à mesma conclusão. Logo, a equação matemática que representa essa consequência é:

$$V = T \times \text{constante ou } \frac{V}{T} = \text{constante.} \quad (4.3)$$

Podemos evidenciar no gráfico correspondente a Fig. 4.2(a), a variação linear do volume com a temperatura dada pela Lei de Charles. Tendo em vista, que as retas encontradas nessa imagem são exemplos de **isóbaras**. Além disso, a temperatura absoluta de uma amostra de um gás de pequena massa específica é proporcional também à pressão, no momento em que o volume é constante (em um procedimento termodinâmico que o seu volume não muda, nomear-se **isocórico**).

$$P = T \times \text{constante ou } \frac{P}{T} = \text{constante.} \quad (4.4)$$

A Figura 4.2(b) ilustra a mudança linear da pressão com a temperatura. As retas nesse diagrama são **isocoras**, isto é, curvas que mostram a variação de uma propriedade a volume constante.

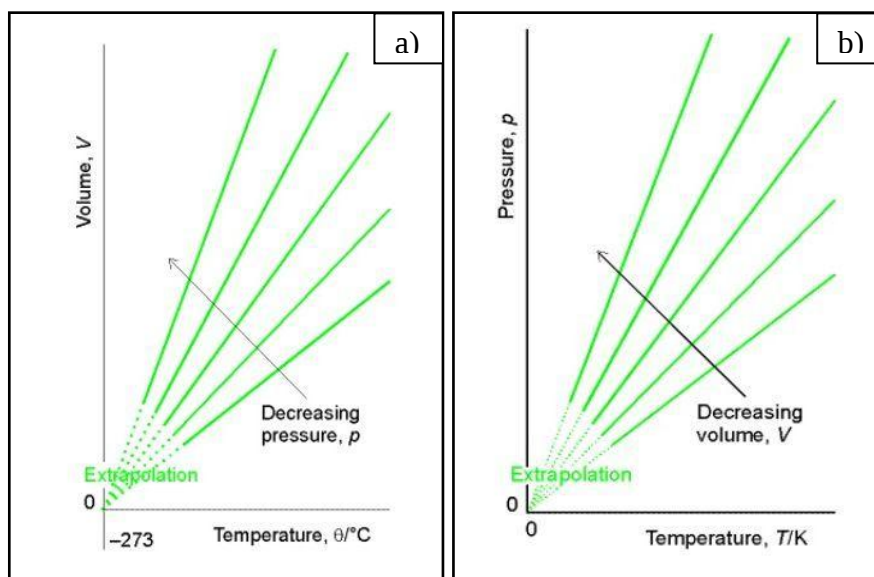


Figura 4.2: (a) Variação do volume de uma quantidade constante de gás com a temperatura a pressão constante. (b) A pressão também modificar-se linearmente com a temperatura, a volume constante. Nos dois casos as retas extrapoladas para zero encontram-se em $T = 0$ (-273°C).

Imediatamente, se visualizarmos os gráficos da Fig. 4.2 e as equações (4.3 e 4.4), observamos que as grandezas são **diretamente proporcionais**, isto é, quando uma medida aumenta a outra também cresce.

Lei de Avogadro

Em 1811, Amedeo Avogadro (1776-1856) descobriu o elo entre o volume e o número de moléculas. A **hipótese de Avogadro**: volumes iguais de gases à mesma temperatura e pressão contêm números iguais de moléculas. Tendo em vista, que em um volume (22,4 L) de qualquer gás a temperatura (0°C) e a pressão (1 atm) contêm $6,02 \times 10^{23}$ moléculas de gás (isto é, 1 mol), conforme a Figura (4.3). Portanto a equação que relaciona essa teoria é:

$$V = n \times \text{constante ou } \frac{V}{n} = \text{constante.} \quad (4.5)$$

Aonde, V é o volume e n é a quantidade de matéria. Assim, dobrando a quantidade de matéria de gás faz com que o volume dobre se T e P estão fixas.

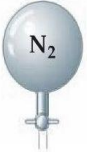
			
Volume	22.4 L	22.4 L	22.4 L
Pressão	1 atm	1 atm	1 atm
Temperatura	0 °C	0 °C	0 °C
Massa de gás	4.00 g	28.0 g	16.0 g
Número de moléculas de gás	6.02×10^{23}	6.02×10^{23}	6.02×10^{23}

Figura 4.3: Com o mesmo volume, sob a mesma pressão e temperatura, amostras de gases diferentes tem o mesmo número de moléculas, mas diferentes massas.

As observações empíricas foram conquistadas ao manter duas das quatro variáveis (P, V, T e n) constantes e ao verificar como as duas outras modificações restantes eram afetadas. Consecutivamente, podemos realizar a junção destes resultados escrevendo a seguinte formula matemática:

$$\frac{PV}{Tn} = \text{constante ou } \frac{PV}{Tn} = R. \quad (4.6)$$

Onde, R é a constante universal dos gases perfeitos. E pode ser obtida da seguinte maneira:

$$R = \frac{PV}{Tn} = \frac{1\text{atm} \times 22,4 \text{ L}}{273 \text{ K}} \approx \frac{1,013 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0,0224 \text{ m}^3}{2,73 \times 10^2 \text{ K}}.$$

O que dá

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = 1,986 \frac{\text{cal}}{\text{mol K}}, \quad (4.7)$$

para 1 mol de gás. Perante essas consequências, obtivemos a **Equação dos Gases Perfeitos** ou **Equação dos Gases Ideais**, como também trivialmente é conhecido.

$$P = \frac{nRT}{V}. \quad (\text{n moles}) \quad (4.8)$$

Embora nenhum gás real obedeça exatamente a esta equação de estado, ela é uma boa aproximação para a maioria dos gases, tanto melhor quanto mais rarefeito o gás e mais longe

estiver do seu ponto de liquefação. Como os pontos de liquefação à pressão normal (1atm) do hidrogênio (-253°C) e do hélio (-269°C) são especialmente baixos, esses gases teriam o comportamento mais próximo de um gás ideal. O gráfico abaixo corresponde a equação de estado voltada a um gás ideal, pois a superfície mostra os únicos estados possíveis para um gás perfeito e os gráficos da Figura 4.1(a), Figura 4.2 (a e b) correspondem a cortes na mesma (Fig. 4.4).

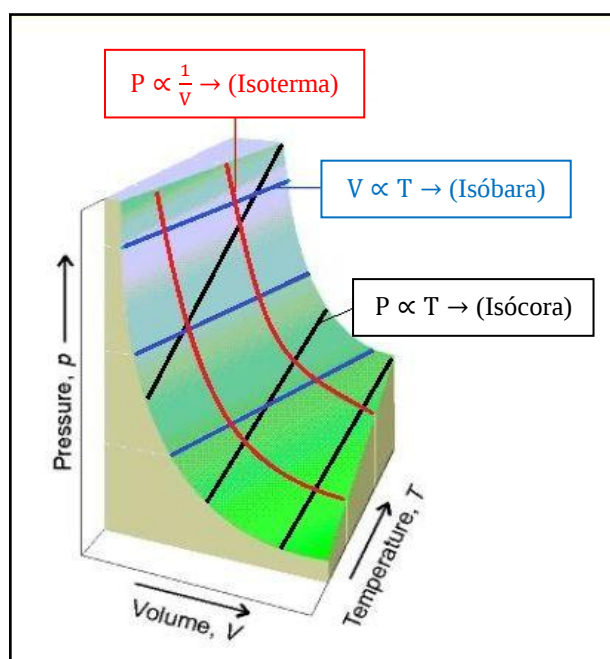


Figura 4.4: Cortes na superfície gerada pela equação dos gases perfeitos, assim podemos ver a uma temperatura constante (Fig. 4.1(a)), a uma pressão constante (Fig. 4.2(a)) e a um volume constante (Fig. 4.2(b)).

Tendo em conta, podemos reescrever a equação dos gases perfeitos de outra maneira. Pois, um **mol** de qualquer substância é a quantidade de matéria que contem o **número de Avogadro** (N_A) de partículas (como átomos e moléculas). O número de Avogadro é definido como o número de átomos de carbono em exatamente 12 g (1 mol) de carbono (12):

$$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}. \quad (4.9)$$

Se tivermos n moles de uma substância então o número de moléculas é:

$$N = nN_A. \quad (4.10)$$

Onde $R = kN_A$, assim a constante k é reconhecida como a **constante de Boltzmann** e o N_A é o número de Avogadro.

$$R = kN_A. \quad (4.11)$$

Substituindo a equação (4.10) na equação (4.11), temos:

$$R = k \frac{N}{n}. \quad (4.12)$$

Empregando a equação (4.12) na lei dos gases perfeitos, obtemos:

$$PV = nk \frac{N}{n} T \rightarrow PV = kNT. \quad (4.13)$$

Aonde, verifica-se experimentalmente que o valor da constante k é adquirido para qualquer tipo de gás:

$$k = 1,381 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} = 8,617 \frac{\text{ev}}{\text{K}}. \quad (4.14)$$

Portanto, depois de passarmos pelas propriedades dos gases vamos diretamente à teoria cinética dos mesmos. Pois, vimos até agora o mundo macroscópico em que os gases estão inseridos. Mas, iremos entrar em um modelo que revela o mundo microscópico referente aos gases.

5 A teoria cinética dos gases

A explicação da atuação de um gás em termos das variáveis macroscópicas de estado **P**, **V** e **T** pode ser associada com médias simples de quantidades microscópicas, como a **massa** e a **rapidez das moléculas do gás**. A teoria resultante é chamada de “**teoria cinética dos gases**”. Do ponto de vista da teoria cinética, um gás confinado consiste em um grande número de partículas em rápido movimento. Tendo em conta, que em um gás a temperatura ambiente, um grande número de moléculas se move com velocidades de centenas de metros por segundo. Estas moléculas sofrem colisões elásticas, tanto entre si quanto com as paredes do recipiente. No contexto da teoria cinética, podemos desprezar a gravidade, de forma que

não possua possíveis escolhas para as moléculas no recipiente, nem orientações preferenciais para seus vetores velocidade. As moléculas estão separadas, em média, por distâncias grandes em comparação com os seus diâmetros. Elas também não efetuam força umas sobre as outras, a não ser nas colisões. (Esta hipótese equivale a supor um gás de muito baixa massa específica, o que, como vimos na secção anterior, é o mesmo que supor que o gás seja um gás ideal. Como a quantidade de movimento é conservada, as colisões entre as moléculas não tem nenhum efeito sobre a quantidade de movimento total, em nenhuma direção. Assim, essas colisões podem ser desprezadas). Então, partiremos para calcular a pressão exercida pelo gás em um universo microscópico.

Pressão Exercida Por Um Gás

A pressão que um gás exerce sobre seu recipiente é oriunda as colisões entre as moléculas do gás e as paredes do reservatório. Esta pressão é uma força por unidade de área e, pela segunda lei de Newton, esta força é a taxa de variação da quantidade de movimento das moléculas do gás colidindo com as paredes. Seja um recipiente retangular de volume V , contendo N moléculas de gás, cada uma de massa m , movendo-se com uma rapidez v . Vamos calcular a força exercida por estas moléculas sobre a parede da direita, que é perpendicular ao eixo x e tem área A . as moléculas que atingem esta parede em um intervalo de tempo Δt são aquelas que se encontram a uma distancia de até $|v_x|\Delta t$ da parede (Fig. 5.1) e que estão se movendo para a direita.

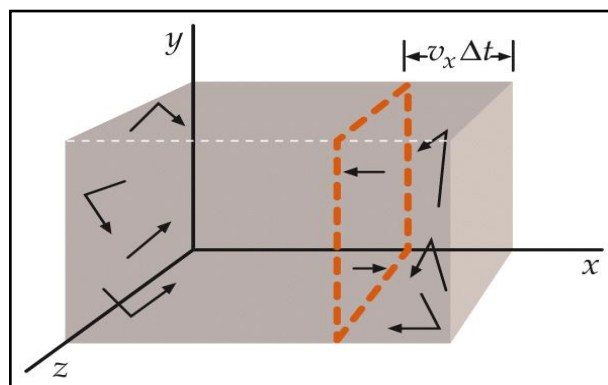


Figura 5.1: moléculas de um gás em um recipiente retangular. As moléculas que se movem para a direita e que estão mais próximas do que $v_x \Delta t$ da parede da direita atingirão esta parede no intervalo de tempo Δt .

Assim, o número de moléculas que atingem a parede no intervalo de tempo Δt é o número por unidade de volume $\left(\frac{N}{V}\right)$ multiplicado pelo volume $A|v_x|\Delta t$ multiplicado por $\frac{1}{2}$ porque, na média, apenas metade das moléculas estão se movendo para a direita. Isto é, no tempo Δt ,

$$\text{Número de moléculas que atingem a parede} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} A |v_x| \Delta t$$

A componente x da quantidade de movimento de uma molécula é $+mv_x$ antes de atingir a parede, e $-mv_x$ depois de uma colisão elástica com a parede. A variação da quantidade de movimento tem a magnitude $2mv_x$. A magnitude da variação total da quantidade de movimento $|\Delta \vec{p}|$ de todas as moléculas no intervalo de tempo Δt é $2m|v_x|$ multiplicado pelo número de moléculas que atingem a parede durante este intervalo:

$$|\Delta \vec{p}| = (2m|v_x|) \times \left(\frac{1}{2} \frac{N}{V} A |v_x| \Delta t\right) = \frac{N}{V} m v_x^2 A \Delta t. \quad (5.1)$$

A magnitude da força exercida pela parede sobre as moléculas, que é o modulo da força exercida pelas moléculas sobre a parede, é a razão $\frac{|\Delta \vec{p}|}{\Delta t}$. A pressão é a magnitude desta força dividida pela área A:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{|\Delta \vec{p}|}{\Delta t} = \frac{N}{V} m v_x^2 \quad \text{ou} \quad PV = Nm v_x^2. \quad (5.2)$$

Para dar conta do fato de que todas as moléculas no recipiente não possuem a mesma rapidez, simplesmente substituímos v_x^2 pela sua media $(v_x^2)_{\text{méd}}$. Então, escrevendo a equação (5.2) em termos da energia cinética $\frac{1}{2} m v_x^2$ associada ao movimento ao longo do eixo x, temos

$$PV = 2N \left(\frac{1}{2} m v_x^2\right)_{\text{méd}} \quad \text{ou} \quad PV = 2N(K)_{\text{méd}}. \quad (5.3)$$

Achada a pressão pela teoria molecular, trataremos neste prezado momento a relação entre a energia interna de translação e a temperatura. Logo, já havia sido informado no tópico referente ao conceito ministrado sobre a temperatura (conceito microscópico).

A Interpretação Molecular da Temperatura

Unindo as equações (4.13) e (5.3) teremos:

$$NkT = 2N \left(\frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{\text{méd}} \text{ ou } \left(\frac{1}{2} m v_x^2 \right)_{\text{méd}} = \frac{1}{2} kT. \quad (5.4)$$

Assim, a energia cinética media associada ao movimento ao longo do eixo x é $\left(\frac{1}{2} kT \right)$. Mas não há nada de especial em relação à direção x. Consecutivamente,

$$(v_x^2)_{\text{méd}} = (v_y^2)_{\text{méd}} = (v_z^2)_{\text{méd}},$$

$$(v^2)_{\text{méd}} = (v_x^2)_{\text{méd}} + (v_y^2)_{\text{méd}} + (v_z^2)_{\text{méd}} = 3(v_x^2)_{\text{méd}}.$$

Fazendo $(v_x^2)_{\text{méd}} = \frac{1}{3}(v^2)_{\text{méd}}$ e chamando de $K_{\text{trans méd}}$ a energia cinética media de translação das moléculas, a equação 5.4 se torna

$$K_{\text{trans méd}} = \left(\frac{1}{2} m v^2 \right)_{\text{méd}} = \frac{3}{2} kT. \quad (5.5)$$

ENERGIA CINÉTICA MÉDIA DE TRANSLAÇÃO DE UMA MOLÉCULA

Além da energia cinética de translação, as moléculas também possuem energia cinética de rotação ou vibração. No entanto, apenas a energia cinética de translação é relevante no cálculo da pressão exercida por um gás sobre as paredes de seu recipiente. A temperatura absoluta é, assim, uma medida da energia cinética média de translação das moléculas. A energia cinética total de translação de n moles de um gás que contém N moléculas é

$$K_{\text{trans méd}} = \left(\frac{1}{2} m v^2 \right)_{\text{méd}} = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT. \quad (5.6)$$

Onde usamos $Nk = nN_A K = nR$. Assim, a energia cinética de translação é $\left(\frac{3}{2}kT\right)$ por molécula e $\left(\frac{3}{2}RT\right)$ por mol. Podemos usar estes resultados para estimar a ordem de grandeza da rapidez das moléculas em um gás. O valor médio de v^2 é, pela equação (5.5),

$$(v^2)_{\text{méd}} = \frac{3kT}{m} = \frac{3N_A kT}{N_A m} = \frac{3RT}{M}.$$

Onde $M = N_A m$ é a massa molar. A raiz quadrada de $(v^2)_{\text{méd}}$ é a raiz quadrada da velocidade quadrática média (rapidez rms):

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{(v^2)_{\text{méd}}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (5.7)$$

RAIZ QUADRADA DA VELOCIDADE QUADRÁTICA MÉDIA DE UMA MOLÉCULA

Note que a equação (5.7) é similar à equação (5.8) para rapidez do som em um gás:

$$v_{\text{som}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}. \quad (5.8)$$

Onde $\gamma = 1,4$ para o ar. Isto não surpreende, porque uma onda sonora no ar é uma perturbação de pressão que se propaga por colisões entre as moléculas de ar.

Livre Caminho Médio

A velocidade média das moléculas de um gás à temperatura ambiente é da colocação de centenas de metros por segundo. Em contra partida, quando destampamos um vidro de perfume numa extremidade de uma casa, por exemplo. As moléculas do perfume não deveriam levar mais do que alguns centésimos de segundo para percorrer o interior da casa e

chegar à outra extremidade, movendo-se com a velocidade média. Logo, objeções deste tipo foram levantadas contra a teoria cinética dos gases nos seus primórdios. Essa evidente impossibilidade é retirada quando trazemos em conta as colisões entre as moléculas do gás. Em implicações destas colisões, a trajetória frequente de uma molécula no gás é um caminho em ziguezague extremamente tortuosos (Fig. 5.2). Em que a molécula se move com movimento retilíneo e uniforme entre cada duas colisões seguidas. As moléculas de perfume no exemplo da casa se propagam por um mecanismo de difusão, no qual a velocidade média efetiva é muito inferior do que se atravessassem em linha reta, sem sofrer colisões, o que esclarece o efeito percebido.

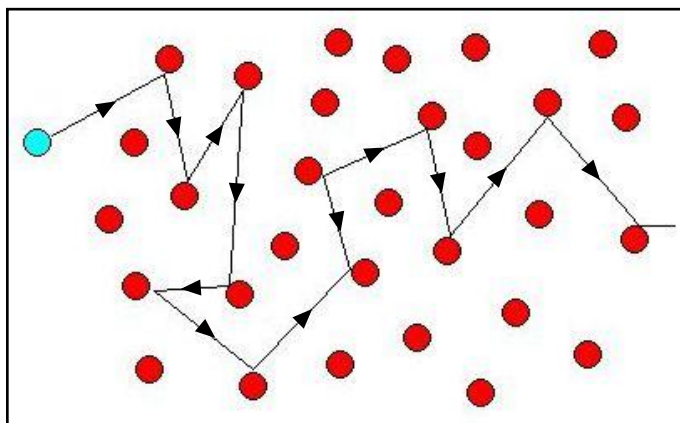


Figura 5.2: Trajetória comum de uma molécula.

À distância transitada pela molécula entre duas colisões flutua ao longo de sua trajetória. O valor médio dessa distância, $\bar{l}$, chama-se **livre caminho médio**. Se tratarmos as moléculas como esferas impenetráveis de diâmetro d , é de se esperar que $\bar{l}$ seja tanto maior quanto menor for d . Com destaque, neste paradigma, as moléculas só colidem entre si quando encostam uma na outra, sendo assim, quando se aproximam a um distanciamento d . Quanto menor for d , menor será a possibilidade que ocorra uma colisão, e maior o valor de $\bar{l}$. No limite de moléculas puntiformes ($d \rightarrow 0$), o livre percurso médio seria infinito ($\bar{l} \rightarrow \infty$). Na realidade, as moléculas não são normalmente esféricas, e não se “**batem**” uma na outra no decurso de uma colisão: as forças intermoleculares repulsivas são de curto alcance, mas existem também forças atrativas de maior alcance, e uma colisão real corresponde a uma

deflexão contínua da trajetória molecular; portanto, d deve ser idealizado como um diâmetro real das moléculas.

O livre percurso médio também deve crescer à medida que o gás se torna mais rarefeito, porque a demanda de colisão decresce do número médio de moléculas n por unidade de volume. Duas moléculas entram em choque quando seus centros O e O' se aproximam de uma distância d (Fig. 5.3(a)), ou, o que é semelhante, quando o centro O' encosta a superfície de uma esfera de raio d com centro em O (Fig. 5.3(b)). Podemos dizer que o volume desta esfera é o volume excluído em torno de O , dentro do qual nenhum centro de outra molécula pode penetrar.

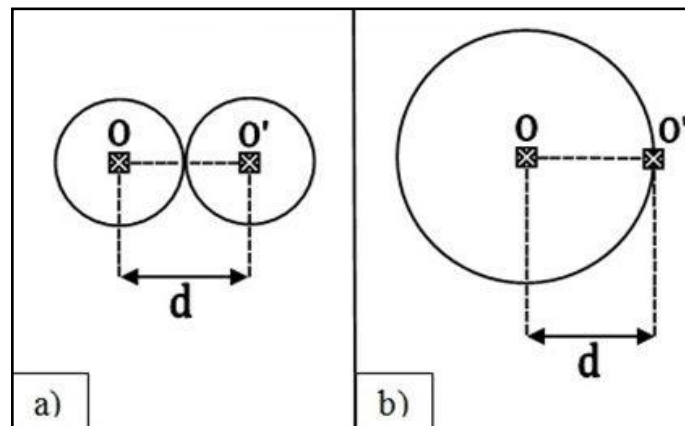


Figura 5.3: Volume excluído.

A esfera de raio d chama-se esfera de exclusão ou esfera de influencia. Note-se que, como seu raio é o dobro do raio da molécula, o volume de exclusão é 8 vezes maior que o volume efetivo v_0 , de uma molécula:

$$\frac{4}{3}\pi d^3 = 8 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = 8v_0. \quad (5.9)$$

Se idealizarmos a molécula de centro “O” cercada por sua esfera de influencia, todas as outras moléculas podem ser tratadas como se fossem puntiformes no que diz respeito a suas colisões com a molécula mencionada. Enquanto “O” percorre sua trajetória em ziguezague, a esfera de influencia varre um volume que é uma espécie de cilindro quebrado com eixo na trajetória e de raio d (Fig. 5.4).

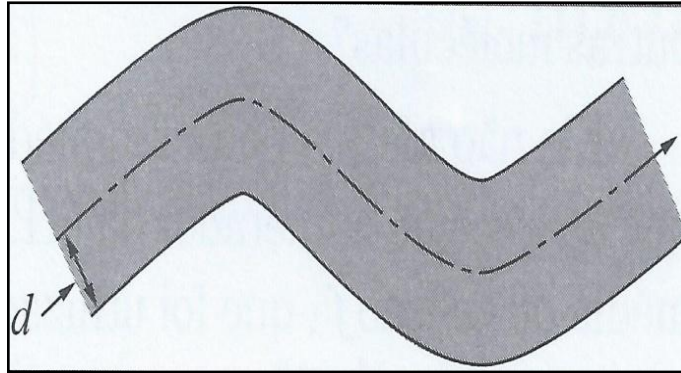


Figura 5.4: Volume varrido.

O número médio de impactos sofridos pelas moléculas de centro O durante seu percurso coincide com o número médio de moléculas cujos centros seriam varridos por esse volume, ou melhor, é correspondente ao volume do cilindro multiplicado por n . Logo, a área da secção transversal do cilindro é

$$\sigma = \pi d^2, \quad (5.10)$$

e é chamada de seção de choque total de colisão, ou seção eficaz, da molécula. Podemos considera-la como a área efetiva que a molécula impede, ou dispõe como alvo, para os centros de outras moléculas. Esta grandeza exerce um papel extremamente fundamental. Para uma primeira aproximação de $\bar{f}$, vamos pensar que todas as moléculas do gás, a não ser a molécula de centro “O”, estão estacionárias, enquanto esta molécula se desloca com velocidade média $\bar{v}$ (que deve ser da ordem de grandeza da velocidade quadrática média). Durante um intermédio de tempo t , o espaço decorrido (em ziguezague) pelo centro O será, em média, semelhante a $\bar{v}t$, e o volume do cilindro arrastado será

$$V = \sigma \bar{v}t. \quad (5.11)$$

O número médio de colisões sofridas pela molécula de centro O durante o período de tempo t será então, como vimos, o número médio de moléculas que estão dentro desse cilindro, isto é,

$$nV = n\sigma \bar{v}t. \quad (5.12)$$

A frequência média de colisão $\bar{f}$, por causa disto, o número médio de colisões por unidade de tempo, obtém-se dividindo por t :

$$\bar{f} = n\sigma \bar{v}. \quad (5.13)$$

Dividindo a distância total atravessada por unidade de tempo, que é homólogo a $\bar{v}$, pelo número médio de colisões por unidade de tempo, $\bar{f}$, adquire-se o livre caminho médio $\bar{l}$:

$$\bar{l} = \frac{\bar{v}}{\bar{f}} = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{\pi n d^2}, \quad (5.14)$$

que, segundo havíamos antecipado, é inversamente proporcional a n e aumenta à medida que d diminui. Contudo, este resultado foi obtido supondo que a molécula considerada se movia e todas as demais permaneceriam em repouso. Qual é o efeito do movimento das outras moléculas? Ele não afeta o percurso médio $\bar{v}$ por unidade de tempo da molécula considerada, que aparece no numerador da equação (5.14), mas modifica a expressão (5.13) da frequência média de colisão $\bar{f}$, que foi utilizada no denominador da eq. (5.14). No cálculo de $\bar{f}$, o que deve intervir não é $\bar{v}$, mas sim $\bar{v}_{rel}$, onde $\bar{v}_{rel}$ é a velocidade relativa entre duas moléculas, à única que intervém no processo de colisão (a velocidade do CM das duas moléculas não afeta a colisão).

Assim, por exemplo, uma molécula que se move na mesma direção e sentido que a molécula considerada, com a mesma velocidade v , não colidirá com ela; outra que se mova com velocidade $-v$, terá velocidade relativa $2v$, e uma que se mova com velocidade v numa direção perpendicular terá velocidade $\sqrt{2}v$. em média sobre todas as direções, a velocidade relativa de um grupo de moléculas de mesma velocidade escalar v será maior que v , o que afeta o valor de $\bar{f}$:

$$\bar{f} = n\sigma\bar{v}_{rel}. \quad (5.15)$$

Em lugar da eq.(5.13). Para estimar o valor de $\bar{v}_{rel}$, consideremos duas moléculas de velocidade v e v' que colidem. A velocidade relativa de colisão será

$$v_{rel} = v - v'. \quad (5.16)$$

O que dá

$$v_{rel}^2 = v^2 + v'^2 - 2v \cdot v'. \quad (5.17)$$

Onde $v \cdot v' = vv' \cos \theta$ (θ = ângulo entre as velocidades), e θ assume todos os valores possíveis. Logo, tomando valores médios,

$$\langle v \cdot v' \rangle = vv' \langle \cos\theta \rangle = 0. \quad (5.18)$$

O que leva

$$\langle v_{\text{rel}}^2 \rangle = \langle v^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle = 2v_{\text{rms}}^2, \quad (5.19)$$

pois, tratando-se de moléculas idênticas,

$$\langle v^2 \rangle = \langle v'^2 \rangle = v_{\text{rms}}^2. \quad (5.20)$$

Pela eq. (5.7). Identificando v_{rms} com $\bar{v}$ ($\bar{v} = v_{\text{méd}}$), da então

$$\bar{v}_{\text{rel}} = \sqrt{2}\bar{v}. \quad (5.21)$$

Substituindo na eq. (5.15) e levando o resultado na eq. (5.14), obtemos finalmente para o livre caminho médio

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}. \quad (5.22)$$

Estamos chegando ao fim da teoria necessária para podermos enfim explicar o aparato experimental, portanto adentraremos neste exato momento ao ultimo tópico. Pois, o conceito final seria o voltado a gases reais.

6 Gases Reais (Equação de Van Der Waals)

Até o prezado momento, lidamos unicamente com o modelo de um gás ideal. Logo, refere-se a depreciar as interações entre as moléculas. Para um gás, elas têm de ser levadas em conta. A força própria de interação entre duas moléculas cujos centros estão separados por uma distancia r procede-se da forma indica na Fig. 6.1. A distâncias menores que r_0 ela é fortemente repulsiva, e cresce tão velozmente que pode ser esquematizada por uma parede impenetrável em $r \approx r_0$. Se houvesse unicamente esta componente repulsiva, as moléculas se comportariam como esferas impenetráveis de raio $\approx r_0$. Este é o modelo de “**bolas de bilhar**” microscópicas que empregamos na argumentação do livre caminho médio, com $d \approx 2r_0$. Então, para $r > r_0$, a força se torna atrativa: a atração máxima dá-se pouco além de r_0 , depois

do que cai rapidamente (**forças de Van der Waals**), de maneira que a abrangência das forças atrativas não é muito maior que r_0 .

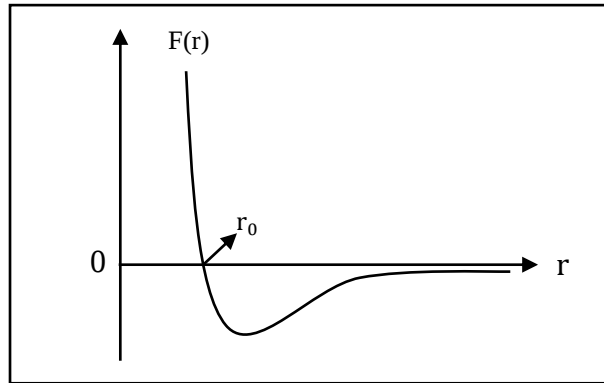


Figura 6.1: Forças de interação entre duas moléculas.

A equação de estado de um gás real difere da de um gás ideal tanto cabido ao efeito da componente repulsiva (tamanho finito das moléculas) como da componente atrativa das forças intermoleculares. Em 1878, J. D. Van der Waals elaborou uma equação de estado para expor um gás real, buscando levar em consideração, pelo menos em primeira aproximação, os dois efeitos, conforme debateremos a seguir.

(i) *Efeito do tamanho finito das moléculas*

Contemplamos na eq. (4.23) que, para fins de cálculo do livre caminho médio, o volume de exclusão vinculado a cada molécula, dentro do qual não pode atravessar o centro de outra molécula, é concedido por

$$\frac{4}{3}\pi d^3 = 8 \times \frac{4}{3}\pi r_0^3 = 8v_0,$$

onde $d = 2r_0$ é o diâmetro efetivo da molécula e v_0 o seu volume efetivo. Desta maneira, seríamos capazes de tratar as moléculas como pontos materiais (nomeados com os respectivos centros), desde que se suprima um volume v_0 ao redor de cada uma. Assim, se N é o número

total de moléculas no volume V , o volume total do recipiente desocupado para ser percorrido pelo centro de uma molécula seria

$$V - 8(N - 1)v_0 \approx V - 8Nv_0. \quad (6.1)$$

Visto que, para cada molécula, encontra-se $(N - 1)$ esferas de exclusão, e N é tão grande que podemos tomar $(N - 1) \approx N$. Poderíamos pensar então que basta fazer a mudança de V por $V - 8Nv_0$ na lei dos gases perfeitos para tomar em consideração o tamanho finito das moléculas. Entretanto, V participou na dedução da equação de estado por meio de $n = N/V$ na eq. (4.17), que entra no cálculo do número de colisões por unidade de tempo das moléculas com as paredes: esse número é proporcional a n . Para que uma molécula venha a se chocar com uma parede, é essencial que seu centro se aproxime da parede a uma distância menor que $r_0 = d/2$. Logo, somente o hemisfério dianteiro da esfera de exclusão associada a cada molécula, quer dizer, aquele direcionado para a parede (Fig. 6.2) é eficiente na exclusão de centros de outras moléculas que venham colidir com a parede: moléculas cujos centros encontram-se no hemisfério traseiro estarão imediatamente a uma distância $> r_0$ da parede e não baterão com ela.

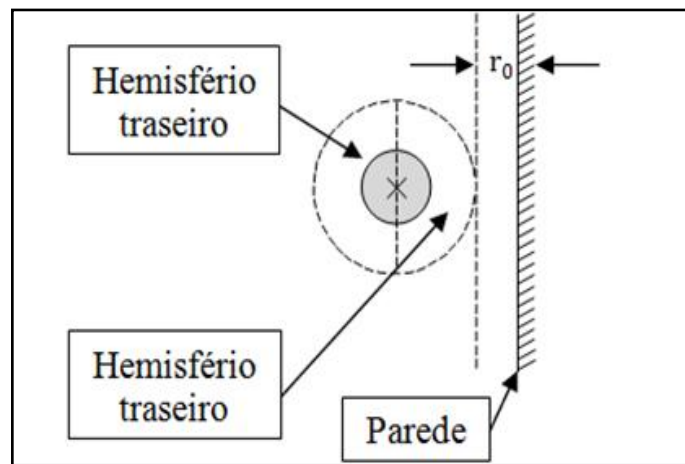


Figura 6.2: Hemisfério de exclusão.

Prontamente, do ponto de vista do efeito do tamanho finito sobre o número de colisões por unidade de tempo com as paredes, não mais que o hemisfério dianteiro de cada esfera de exclusão deve ser considerado. O valor eficaz de n na eq. (4.17) obtém-se fazendo a seguinte troca:

$$V \rightarrow V - 4Nv_0, \quad (6.2)$$

isto é, o volume total excluído é apenas a metade do que foi levado em observação na equação (6.1). Seja v o volume molar, ou melhor, o volume de 1 mol do gás: a equação de estado dos gases ideais (4.8) se registraria $Pv = RT$. Para este fim, $N = N_0$ (é o número de Avogadro), de forma que a (6.2) fica

$$v \rightarrow v - b, \quad (6.3)$$

onde

$$b = 4N_0v_0 = 4N_0 \times \frac{4}{3}\pi v_0^3, \quad (6.4)$$

é uma constante intrínseca do gás (dependente de r_0) chamada de **covolume**. Efetuando a alteração da eq. (6.3) na lei dos gases perfeitos, obtemos

$$P = \frac{RT}{v - b}, \quad (1 \text{ mol}) \quad (6.5)$$

equação de estado que já havia sido mencionada por Clausius para levar em conta o tamanho finito das moléculas. As isotermas pertencentes à eq. (6.5) (Fig. 6.3) são hipérboles, como no caso de um gás ideal (Fig. 4.1(a)), com a assíntota vertical deslocada para $v = b$ em lugar de $v = 0$: seria preciso exercer pressão infinita para baixar o volume molar v até o covolume b .

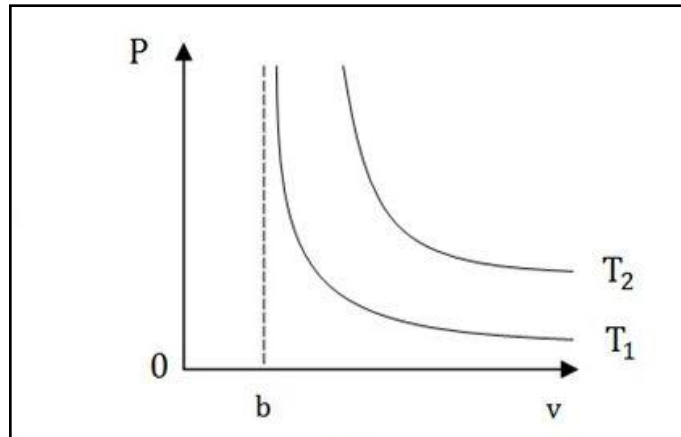


Figura 6.3: Isotermas de Clausius.

Na prática, em um modelo de esferas impenetráveis, o sistema se torna incompressível (o que podemos associar à transição do gás para o líquido) quando as moléculas estão todas se tocando, o que corresponderia a um volume inferior a b , mas a dedução que fizemos não pode ser extrapolada a este caso limite.

(ii) Efeito da interação atrativa

Levamos em conta na equação (6.5) o efeito da parte repulsiva das forças de interação $F(r)$ entre as moléculas (Fig. 6.1). Vejamos neste momento o efeito da interação atrativa ($r > r_0$), que também cai muito rapidamente (forças de Van der Waals), de modo que seu alcance é também da ordem de grandeza de r_0 . Uma molécula no interior do gás é atraída por outras moléculas, em média distribuídas em torno dela uniformemente e isotropicamente em todas as direções. Logo, os efeitos da atração das demais moléculas se compensam. Todavia, para moléculas que se deparam na vizinhança das paredes, ou seja, aquelas consideradas no cálculo da pressão, isto não se utiliza, pois todas as demais moléculas do gás ficam localizadas no hemisfério traseiro, e a força de atração média resultante por elas exercida (Fig. 6.4) tem sentido contrário a pressão do gás sobre as paredes, equivalendo, portanto a um decréscimo de pressão.

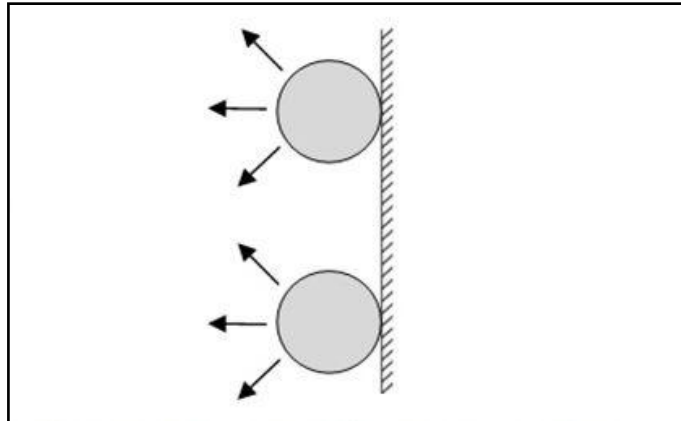


Figura 3.6.4: Atração das moléculas perto das paredes.

A força atrativa resultante sobre cada molécula é empregada essencialmente pela camada de moléculas vizinhas, de espessura $\sim 2r_0$, uma vez que o alcance das forças atrativas é da ordem de r_0 . A força é proporcional ao número de moléculas nesta camada, que é proporcional a densidade $n = N/V$ de moléculas do gás. As moléculas que experimentam esta força atrativa são as que se encontram a uma distância $\sim r_0$ da parede, cujo número também é proporcional a n . Como a força atrativa sobre cada uma delas é proporcional a n , a diminuição de pressão é proporcional a n^2 , desta forma, para 1 mol do gás ($N = N_0$), é proporcional a $1/v^2$:

$$\Delta P = -\frac{a}{v^2}, \quad a > 0 \quad (6.6)$$

onde a constante positiva **a** é característica do gás. O termo ΔP , que é chamado de **compressão**, deve ser acrescentado ao 2º membro da eq. (6.5). Passando-o para o 1º membro, obtemos finalmente a **Equação de Estado de Van der Waals**

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (1 \text{ mol}) \quad (6.7)$$

A superfície (Fig. 6.5) gera pela equação de Van der Waals nos mostra os estados possíveis permitidos pela equação. Contudo, se observarmos bem, percebemos de cara certa distinção

entre a superfície formada pela equação de estado para o gás ideal. Pois, aparece uma mudança nas hipérboles quando a uma alteração na isoterma da equação de Van der Waals (trataremos com mais rigor a frete).

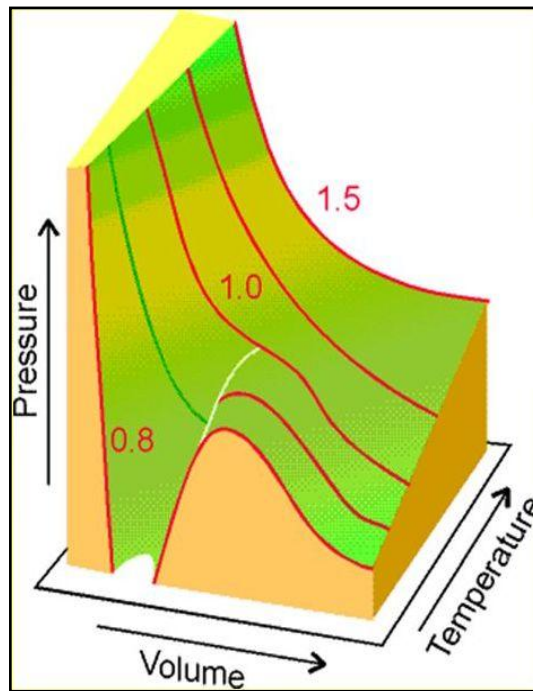


Figura 3.6.5: Superfície gerada pela equação de Van der Waals.

Onde os parâmetros **a** e **b** na equação (6.7) se chamam as **Constantes de Van der Waals** da substância considerada (Tab. 01).

Tabela 6.1: Constantes de Van der Waals, valores para algumas substâncias		
	$a/(\text{atm dm}^6 \text{mol}^{-2})$	$b/(10^{-2} \text{dm}^3 \text{mol}^{-1})$
Ar	1,337	3,20

CO ₂	3,610	4,29
He	0,0341	2,38
Xe	4,137	5,16

A vantagem da equação de Van der Waals, no entanto, é ser analítica (isto é, ser expressa simbolicamente) e possibilitar a obtenção de algumas conclusões gerais sobre o comportamento dos gases reais. Quando a equação falha, temos que usar outra equação de estado que tenha sido proposta (algumas estão listadas na Tab. 02) ou devemos inventar uma nova equação de estado.

Tabela 6.2: Algumas equações de estado					
	Equação	Forma reduzida	P _c	v _c	T _c
Gás perfeito	$P = \frac{RT}{v}$				
Van der Waals	$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$	$P = \frac{RT_r}{3V_r - b} - \frac{3}{V_r^2}$	$\frac{a}{27b^2}$	3b	$\frac{8a}{27bR}$
Diaterici	$P = \frac{RTe^{-\left(\frac{a}{RTv}\right)}}{v-b}$	$P = \frac{e^2 T_r e^{-\left(\frac{2}{T_r V_r}\right)}}{2V_r - 1}$	$\frac{a}{4e^2 b^2}$	2b	$\frac{a}{4bR}$
Virial	$P = \frac{RT}{v} \left\{ 1 + \frac{B(T)}{v} + \frac{C(T)}{v^2} + \dots \right\}$				

Mais adiante iremos tratar as coordenadas críticas da equação de Van der Waals, mas por hora vamos utiliza-las a forma reduzida apresentada na tabela a cima. Pois, as coordenadas reduzidas são encontradas da seguinte maneira: dividindo-se a coordenada do gás pela coordenada crítica correspondente, então se procede:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad V_r = \frac{v}{v_c} \quad T_r = \frac{P}{T_c}. \quad (6.8)$$

(iii) Isotermas de Van Der Waals

As isotermas associadas a eq. (6.7) podem ser construídas a partir das correspondentes a eq. (6.5), representadas na Fig. (6.3), acrescentando a correção ΔP da eq. (6.6) em cada ponto, ou seja, subtraindo $\left(\frac{a}{v^2}\right)$ da ordenada, para um ponto de abscissa v . para v grande, esta correção se torna muito pequena, de modo que as isotermas se aproximam das hipérboles. Para T grande, o 2º membro da eq. (6.5) é bem maior que a correção ΔP dada pela eq. (6.6), e as isotermas continuam sendo aproximadamente hipérboles. Logo, os desvios em relação ao comportamento de gás ideal ocorrem principalmente a temperaturas mais baixas ou volumes molares menores (gases mais condensados), como seria de esperar.

Para v suficientemente pequeno, a subtração do termo $\left(\frac{a}{v^2}\right)$ faz baixar as isotermas de distancias consideráveis em relação às hipérboles, levando a curvas do tipo representado na Fig. (6.6). Para P e T dados, a eq. (6.7) é uma equação do 3º grau em v . se T é suficientemente baixo, essa equação tem 3 raízes reais, ou seja, uma horizontal $P = P_1 = \text{constante}$ corta a isoterma em 3 pontos 1, 2 e 3 (Fig. 6.6), dando 3 valores distintos de v para os mesmos P e T (veremos logo como interpretar este resultado). À medida que T sobe, esses 3 pontos de intersecção vão se aproximando, até que, para uma dada temperatura $T = T_c$, as raízes se confundem num único ponto C (Fig. 6.6); para $T > T_c$, passa a haver somente uma raiz real.

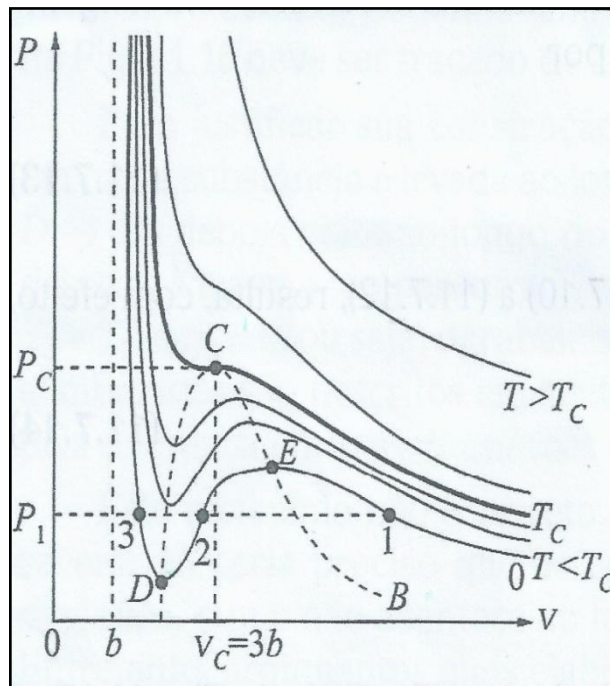


Figura 6.6: Isotermas de Van der Waals.

Para $T < T_c$, cada isoterma passa por um mínimo D e um Máximo E (Fig. 6.6), que para $T = T_c$ se confundem em C, que é um ponto de inflexão com tangente horizontal. O lugar geométrico dos máximos e mínimos é uma curva BCD (em linha interrompida na figura a cima), cujo máximo é C. a equação da curva BCD é, pela eq. (6.7),

$$0 = \frac{dP}{dv} = \frac{d}{dv} \left(\frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \right) = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3} = -\frac{\left(P + \frac{a}{v^2} \right)}{v-b} + \frac{2a}{v^3}. \quad (6.9)$$

O que dá, resolvendo em relação a P,

$$P_0 = \frac{a}{v^2} - \frac{2ab}{v^3}. \quad (\text{curva BCD}) \quad (6.10)$$

As coordenadas do ponto C, máximo desta curva, se obtêm resolvendo

$$0 = \frac{dP_0}{dv} = -\frac{2a}{v^3} + \frac{6ab}{v^4} = \frac{2a}{v^4}(3b - v)$$

cuja raiz é

$$v_c = 3b. \quad (6.11)$$

O valor de P correspondente, $P = P_c$, se obtém substituindo a eq. (6.11) na eq. (6.10):

$$P_c = \frac{a}{9b^2} - \frac{2ab}{27b^3} \rightarrow P_c = \frac{a}{27b^2}. \quad (6.12)$$

Finalmente, a temperatura T_c da isoterma que passa pelo ponto C se obtém substituindo as equações (6.10 e 6.11) na equação (6.7)

$$RT_c = \frac{8a}{27b}. \quad (6.13)$$

Essa isoterma chama-se isoterma crítica. É fácil verificar que o ponto crítico C é ponto de inflexão da isoterma crítica, com tangente horizontal, calculando $\frac{d^2P}{dv^2}$, que, pelo eq. (6.9), é dado por

$$\frac{d^2P}{dv^2} = \frac{2RT}{(v-b)^2} - \frac{6a}{v^4}. \quad (6.14)$$

Substituindo nesta expressão os valores críticos (equações 6.11 e 6.13), resulta, com efeito,

$$\left(\frac{d^2P}{dv^2}\right)_c = 0. \quad (6.15)$$

(iv) *Discussão*

Ao longo da porção DE de uma isoterma de Van der Waals com $T < T_c$ (veja Fig. 6.6), v cresce quando P aumenta, ou seja, definindo o módulo de compressibilidade isotérmico K_T por

$$K_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T. \quad (6.16)$$

Temos $K_T < 0$. Um sistema em que $K_T < 0$ não pode existir em equilíbrio térmico, por que seria instável, ou seja, equilíbrio estável de uma partícula seria: qualquer flutuação do sistema a partir desse ponto, por menor que seja, irá afastá-lo dele cada vez mais. Um sistema desse tipo entraria em colapso, porque, quanto mais diminuísse o seu volume, menor seria a pressão necessária para mantê-lo em equilíbrio. Logo, as porções de isotermas em que P cresce com v não podem existir. Que acontece com um gás real se, partindo de um ponto onde ele se aproxima de um gás ideal, ou seja, com v grande e P pequeno, para $T < T_c$, formos comprimindo gradativamente o gás?

A principio, partindo de um ponto como A na Fig. (6.7), o gás segue uma isoterma do tipo Van der Waals. Entretanto, atingindo um determinado ponto 1 dessa isoterma, e continuando a reduzir o volume do sistema (por exemplo, através de um recipiente munido de um pistão). A pressão deixa de aumentar, permanecendo constante no valor P_1 . A diminuição de volume do sistema é acompanhada de uma transição de fase, em que ele se condensa, passando da fase gasosa para a fase líquida. Inicialmente vão aparecendo gotas de liquido, e a proporção líquido/gás vai aumentando á medida que v diminui, sempre com $P = P_1$, até que o sistema tenha passado inteiramente ao estado líquido, no ponto 3. A partir do ponto 3, a

isoterma tipo Van der Waals é retomada, com forte aumento de pressão para pequena redução de volume, correspondendo ao caractere quase incompressível do líquido. Vemos, por conseguinte que a porção $A \rightarrow 1$ da isoterma representa a fase gasosa, a porção $3 \rightarrow F$ a fase líquida, e a porção horizontal $1 \rightarrow 3$ corresponde a coexistência das fases líquida e gasosa. A pressão $P = P_1$ em que essa existência ocorre a temperatura T chama-se pressão de vapor a temperatura T (um gás com $T < T_c$ costuma ser chamado de vapor). Como se determina o ponto 1 de uma isoterma de Van der Waals onde começa a ocorrer a transição de fase? Segundo uma regra proposta por Maxwell, o segmento horizontal $1 \rightarrow 3$ na Fig. (6.8) deve ser traçado de tal forma que as áreas sombreadas $1E2$ e $2D3$ sejam iguais.

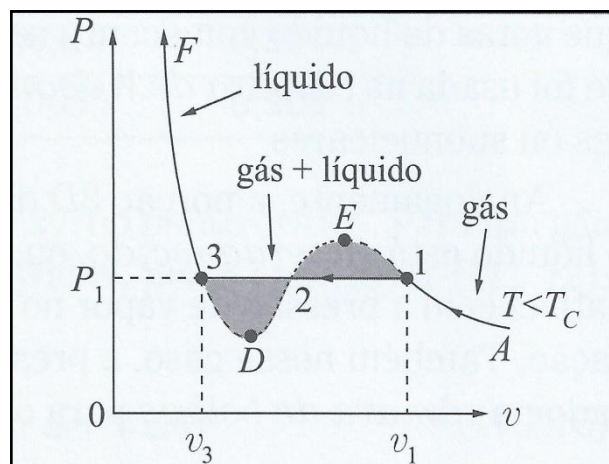


Figura 6.7: Transição de Fase.

Para justificar sua construção, Maxwell imaginou um ciclo termodinâmico reversível, em que a substância é levada ao longo da isoterma de Van der Waals no sentido $1 \rightarrow E \rightarrow 2 \rightarrow D \rightarrow 3$ e depois volta ao longo do segmento horizontal $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. Como este ciclo é todo descrito à mesma temperatura T , ou seja, é isotérmico, o seu rendimento, é visto pelo conceito da segunda lei da termodinâmica (máquinas térmica). Então as temperaturas são equivalentes com $T_2 = T_1$, pois o processo é dito isotérmico. Logo a eficiência do processo é $\eta_R = 0$, ou seja, o trabalho total realizado é nulo. Como os contornos das duas áreas sombreadas são descritos em sentidos opostos, esse trabalho é representado graficamente pela diferença entre as duas áreas, o que levaria à construção de Maxwell. Este raciocínio não é correto. Com efeito, para que se tivesse um ciclo termodinâmico reversível, seria preciso que os estados

percorridos fossem estados de equilíbrio termodinâmico, o que não acontece ao longo da porção instável das isotermas de Van der Waals. Entretanto, argumentos mais elaborados, que não poderemos discutir aqui, mostram que a prescrição de Maxwell (áreas iguais) é correta.

A porção 1E da isoterma de Van der Waals pode ser realizada experimentalmente: ela corresponde a estados em que o vapor se encontra a pressão mais elevada que a pressão de vapor à temperatura T , sem que ele se condense. É o que se chama um vapor supersaturado. Isto ocorre, por exemplo, com vapor de água na alta atmosfera. Entretanto, é uma situação de equilíbrio instável: basta que apareçam núcleos de condensação, tais como partículas carregadas ou minúsculos grãos de poeira em suspensão, para que gotas de líquido comecem a se condensar em torno desses núcleos. Esta propriedade foi usada na câmara de Wilson para materializar as trajetórias de partículas nucleares ou subnucleares. Analogamente, a porção 3D da isoterma (Fig. 6.7) representa estados em que o líquido está superaquecido, ou seja, a temperatura T é mais alta do que aquela compatível com a pressão de vapor no ponto considerado da isoterma, sem que haja vaporização. Também neste caso, a presença de núcleos provoca a vaporização, o que é utilizado na câmara de bolhas para observar trajetórias de partículas de alta energia.

As isotermas de um gás real (Fig. 6.8) são análogas a de um gás de Van der Waals, com as porções instáveis substituídas por segmentos de reta horizontais na região de coexistência de líquido + vapor. Esta região é delimitada pela curva ACB.

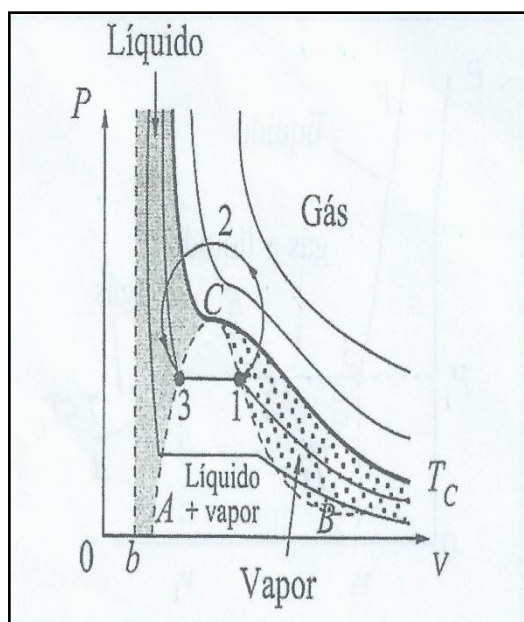


Figura 6.8: Isotermas de um gás real.

Acima da isoterma crítica T_c , temos gás. Na região sombreada, abaixo de T_c e acima de AC , temos líquido. Acima de T_c , por mais que aumentemos a pressão, o gás não se liquefaz. Oxigênio, nitrogênio e hidrogênio eram chamados de “**gases permanentes**” antes de se reconhecer que não haviam sido liquefeitos por não se ter atingido temperaturas abaixo da temperatura crítica dessas substâncias (vide valores na Tab. 03); o O_2 foi liquefeito pela primeira vez em 1877. À medida que T se aproxima de T_c por valores inferiores, vai diminuindo o comprimento da porção horizontal das isotermas, ou seja, a diferença entre os volumes molares do líquido e do vapor à pressão de vapor. No ponto crítico, essa diferença desaparece. Para $T > T_c$, a substância passa de forma contínua e homogênea da região de vapor à região de líquido, sem que haja em qualquer momento uma separação de fase. Assim é possível passar do ponto 1 (vapor) da Fig. (6.8) ao ponto 3 (líquido) de forma contínua, “**dando a volta por cima**” pelo caminho $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ indicado na figura. É o que se chama continuidade entre os estados líquido e gasoso. Vemos na ultima coluna da tabela que o valor de Pv/RT no ponto crítico.

Tabela 6.1: Valores de T_c , P_c , ρ_c (densidade no ponto crítico) para diversas substâncias.				
Substância	T_c (K)	P_c (atm)	ρ_c (g/cm ³)	$\frac{P_c v_c}{RT_c}$
H ₂ O	647,50	218,50	0,3250	0,230
O ₂	154,60	49,70	0,4100	0,292
N ₂	126,00	33,50	0,3100	0,291
H ₂	32,98	12,76	0,0314	0,304
Hélio 4	5,19	2,25	0,0690	0,308

Para um gás ideal, seria igual a 1 unidade. Para um gás de Van der Waals, pelas equações (6.11 a 6.13), teríamos

$$\frac{P_c v_c}{RT_c} = \frac{3}{8} = 0,375. \quad (\text{Van der Waals}) \quad (6.17)$$

O que difere apreciavelmente dos valores experimentais da tabela. Por outro lado, pela eq. (6.11), é $v_c = 3b$, e não seria de se esperar que a equação de Van der Waals desse muito bons resultados nesta região, em que as moléculas ocupariam quase todo o volume do recipiente.