UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE QUÍMICA

Programa de Pós-Graduação em Bioquímica

Rodrigo Machado Martins

A transposição didática do papel termodinâmico do ATP gera conceitos alternativos?

Versão corrigida

São Paulo

Data do Depósito na SPG:

15/07/2012

Rodrigo Machado Martins

A transposição didática do papel termodinâmico do ATP gera conceitos alternativos?

Dissertação apresentada ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências (Bioquímica)

Orientador: Prof. Dr. Bayardo B. Torres

São Paulo

2012

Rodrigo Machado Martins

A transposição didática do papel termodinâmico do ATP gera conceitos alternativos?

Dissertação apresentada ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências (Bioquímica).

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Assinatura: _____

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que de alguma forma ajudaram a construí-lo.

AGRADECIMENTOS

Considerando esse trabalho como resultado de uma caminhada de quatro anos, agradecer não será uma tarefa fácil e nem justa. Para não correr o risco de cometer alguma injustiça, agradeço de antemão a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje. Particularmente, algumas pessoas merecem destaque:

Aos companheiros do LEB, iniciando pelo nosso mestre, Professor Bayardo Baptista Torres, que em agradáveis conversas influenciou tanto na minha formação como professor como na minha formação pessoal. Hoje sou uma pessoa melhor em função do convívio com o senhor. Aos amigos Erik e Israel, que proporcionaram conversas muito construtivas e afáveis. Ao professor Guilherme Marson, que com seu caldeirão de ideias fez transbordar um pouco delas no meu trabalho.

Ao CNPq pelo fundamental apoio financeiro.

Aos meus amigos pela paciência de me escutar.

A vocês, meus pais, irmãs e irmão, pela força e amor incondicional. Obrigado!

Adélia, minha querida esposa e companheira da vida, obrigado pela paciência, amor e, principalmente pela nossa joia: Isadora. Amo vocês!

“Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria que o fator isolado mais importante, influenciando a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Determine isso, e ensine-o de acordo”

Ausubel (1978)

RESUMO

Martins, M. R. **A transposição didática do papel termodinâmico do ATP gera conceitos alternativos?** 2012. 67p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Bioquímica. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Conceitos prévios, ou alternativos, são ideias introjetadas no universo cognitivo dos estudantes que diferem daqueles credenciados pela ciência estabelecida. São bastante estudadas as consequências da presença deste tipo de conceitos para o aprendizado. Entre outras dificuldades provocadas pelos conceitos alternativos está a impossibilidade de utilizá-los para embasar novos conhecimentos. Nestas condições, incapazes de decodificar apropriadamente as novas informações apresentadas pelas disciplinas, os alunos são inconscientemente encaminhados para a memorização. A origem dos conceitos prévios é variada. Uma das causas já detectadas é a precariedade da transposição didática, feita pelos autores dos livros textos ou por docentes.

Uma das moléculas fundamentais para os estudos bioquímicos é a adenosina trifosfato (ATP), que desempenha múltiplas funções. Uma das principais é participar de processos que requerem energia. A compreensão do papel desta molécula é fundamental para o entendimento dos processos dos quais ela participa.

Um dos objetivos do presente trabalho foi investigar equívocos sobre o papel termodinâmico do ATP nos processos celulares. Os testes foram realizados com alunos do ensino médio (EM), graduação (G) e pós-graduação

(PG). A existência de concepções alternativas foi verificada, assim como sua estabilidade nos diferentes níveis de escolaridade: um resultado mostra que 68% EM, 92% G e 91% PG afirmaram que a energia da hidrólise de ATP é responsável por conduzir os processos celulares. Os resultados gerais mostram que os estudantes carregam equívocos em conceitos termodinâmicos básicos, tais como transferência de energia e espontaneidade de reações químicas.

Duas possíveis fontes de conceitos alternativos da termodinâmica do ATP são o professor e o livro didático. Nesse trabalho foi verificado que os livros de ensino médio e graduação podem contribuir para a instalação de conceitos alternativos referentes ao ATP. Nos livros analisados, principalmente os de ensino médio, foram encontrados passagens, analogias e esquemas que podem contribuir para isso.

E por fim, uma interferência didática foi feita com o intuito de corrigir o entendimento dos alunos no que diz respeito ao papel do ATP nas reações químicas. Alunos monitorados por meio de pré e pós-testes apresentaram resultados animadores em relação à atenuação de conceitos relacionados à termodinâmica do ATP. Dos alunos que participaram da intervenção, mais de 80% responderam e justificaram corretamente os testes feitos pós-intervenção.

Palavras-chave: conceitos alternativos sobre o ATP, transposição didática – ATP, termodinâmica – conceitos alternativos.

Abstracts

Martins, R. M. **Does the didactic transposition of the thermodynamic role of ATP generate alternatives concepts?** 2012, 73p. Masters Thesis – Graduate Program in Biochemistry. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Misconceptions, or alternative concepts, are introjected ideas in the students` cognitive universe that differ from those established by science. The consequences of alternative concepts for the learning process are widely studied. Among other difficulties caused by alternative concepts is the impossibility to use them to support new knowledge. Under these conditions, unable to properly decode the new information submitted by the disciplines, students are unconsciously driven to memorization. The origin of the alternative concepts is varied and an already detected reason is the precariousness of didactic transposition by textbooks writers and teachers.

One of the fundamental biochemical molecules is ATP which play multiple roles. A key role is its participation in energy requiring processes. Understand this molecule role is fundamental to understand the processes which it takes part.

The present work aims at the investigation of misconceptions on the ATP's thermodynamic role on cellular processes. Tests were carried out with high school students (HS), undergraduate (U) and graduate students involved in PhD programs (G). Misconceptions were observed as well as its stability along different levels of education: 68% (HS), 92% (U) and 91% (G) students stated that the energy from ATP hydrolysis is responsible for driving cellular energy-demanding processes. The overall results show that students carry

misconceptions on basic thermodynamic concepts such as energy transfer and chemical reactions spontaneity.

Misconceptions on ATP thermodynamics have the teacher and the textbook as possible sources. In this study it was found that books from all levels may contribute to insert or preserve misconceptions on ATP. From the analyzed books, especially for the high school, there were quotes, analogies and diagrams that can contribute to it.

Finally, in order to correct the students' understanding regarding the role of ATP in chemical reactions a didactic intervention was made. Students were tested through pre- and post-tests dealing with the subject in study. Of the students who participated in the intervention, over 80% correctly answered and explained the post-intervention tests.

Key-words: alternative concepts about ATP, didactic transposition – ATP, thermodynamic – alternative concepts.

Sumário

1 – INTRODUÇÃO **13**

2 – OBJETIVOS **24**

3 – MATERIAIS E MÉTODOS **25**

3.1 – INVESTIGAÇÃO DE CONCEITOS ALTERNATIVOS DO PAPEL TERMODINÂMICO DO ATP 25

3.2 – ANÁLISE DOS TRABALHOS DE REFERÊNCIA E LIVROS DIDÁTICOS 27

3.3 – INTERVENÇÃO DIDÁTICA 30

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO **32**

4.1 – INVESTIGAÇÃO DOS CONCEITOS ALTERNATIVOS 32

4.2 – ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICOS 43

4.3 – INTERVENÇÃO DIDÁTICA 70

5 - CONCLUSÕES **74**

6 – REFERÊNCIAS **75**

APÊNDICE 1 ..... **79**

APÊNDICE 2 ..... **82**

APÊNDICE 3 ..... **84**

1. INTRODUÇÃO

Aprendizagem significativa é o conceito central da teoria de Ausubel. Esse processo se dá pela relação substancial, e não arbitrária, de uma nova informação com um aspecto relevante da estrutura cognitiva do aprendiz (Ausubel, D., apud Moreira *et al* 1982). Entende-se por estrutura cognitiva, no contexto de aprendizagem, o conjunto e a organização de ideias de um indivíduo em uma área particular do conhecimento.

Nesse processo de aprendizagem, novas informações interagem com um conceito específico pré-existente, servindo de ancoradouro para a nova informação, que Ausubel chama de conceito “subsunçor”. Quando o conteúdo escolar a ser aprendido não consegue ligar-se a algo já conhecido, ocorre o que Ausubel chama de aprendizagem mecânica, em que novas informações são incorporadas sem interagir com conceitos relevantes já existentes na estrutura cognitiva, levando à memorização.

> *“Sempre que uma pessoa tenta compreender algo, precisa ativar uma ideia ou conhecimento prévio que sirva para organizar essa situação e dar-lhe sentido. Contudo, a ativação de conhecimentos prévios, mesmo sendo necessária para compreensão, não garante um aprendizado adequado dos novos conceitos apresentados. O objetivo do aprendizado significativo é que, na interação entre os materiais de aprendizagem, e os conhecimentos prévios ativados para dar-lhe sentido, esses conhecimentos prévios sejam modificados, fazendo surgir um novo conhecimento; contudo, quando os alunos tentam compreender uma nova situação a partir dos seus conhecimentos prévios, o que muda é essa nova informação, que é interpretada em termos de conhecimentos prévios, sem que eles sofram praticamente nenhuma mudança.*

> *Os alunos, como qualquer um de nós, interpretam qualquer situação ou conceito que lhes for apresentado a partir de seus conhecimentos prévios, e como consequência disso, o ensino da ciência praticamente não muda esses conhecimentos prévios, a partir dos quais os alunos interpretam os conceitos científicos que lhes são ensinados, visto que, em vez de reinterpretar seus conhecimentos prévios em função dos conceitos científicos, costumam fazer o contrário: assimilar a ciência aos seus conhecimentos cotidianos. " (Pozo, 2009 - pág 87)*

Para exemplificar o que foi dito anteriormente, quando se explica ao aluno a noção de movimento intrínseco das partículas, ele assimila isso à sua própria concepção intuitiva, que modo que acaba assumindo que as partículas se movimentam somente quando apresentam um movimento aparente, como no caso dos gases e de alguns líquidos (Pozo, 2009), o que impede de compreender a teoria cinético-molecular.

Sendo assim, a aprendizagem significativa só ocorrerá se houver conceitos claros e disponíveis na estrutura cognitiva do aprendiz que sirvam de base para a construção de novos conceitos. Assim, para que a aprendizagem aconteça de maneira significativa é necessário que a interação entre estrutura cognitiva do aprendiz e as novas informações não aconteça de maneira arbitrária, mas sim contribuindo para uma diferenciação, estabilização e ampliação dos conceitos pré-existentes.

Desta forma, como a informação nova é ancorada em conhecimentos anteriores, à medida que se avança na escolaridade, mais conceitos prévios são necessários, o que faz do aprendizado um processo contínuo e

acumulativo. Porém, muitas destas concepções estão distorcidas, o que dificulta o estabelecimento de novos conceitos.

Considerando esses pressupostos, no aprendizado científico, um dos problemas encontrados é a existência de **conceitos alternativos** - ideias introjetadas no universo cognitivo dos estudantes que diferem daquelas credenciadas pela ciência estabelecida. Uma vez integrados à estrutura cognitiva do estudante, estes conceitos interferem no aprendizado subsequente, conectando de maneira inapropriada o conhecimento que se quer ensinar com o já existente (Driver and Easley; apud Posner, G. J. *et al.,* 1982; Fleer, M., 1999; Palmer, D., 1999). Os estudos nessa área revelaram que as ideias alternativas de crianças e adolescentes são pessoais, fortemente influenciadas pelo contexto do problema e bastante estáveis e resistentes à mudança, de modo que é possível encontrá-las mesmo entre estudantes universitários (Viennot, 1979).

Nestas condições, prejudicados na decodificação apropriada de informações novas, os alunos podem ser encaminhados para a memorização, e para a criação de um perfil cognitivo concorrente – com instrumental próprio.

O surgimento dos conceitos alternativos se dá de diversas maneiras, pois, pelo simples fato de viver num mundo com inúmeras fontes de informação, o aprendiz desenvolve um conjunto de ideias que tenta explicar os fenômenos que ocorrem no seu dia a dia (Gilbert *et al.*; Griffiths *et al.* apud Özmen H., 2004). O contato com novas informações pode ocorrer por meio da experiência diária ou da instrução. Apresentações deformadas ou simplificadas de certos conceitos levam a uma compreensão errônea, desviada, por parte

dos alunos, que não fazem mais do que repetir a informação ou interpretação recebida.

Skelly *et al.* (apud Nakiboglu *et al.,* 2006) propuseram a divisão dos conceitos alternativos em duas categorias: *experimental* e *instrucional.* Conceito alternativo *experimental* é um conceito incorporado por meio da experiência diária e interação com o fenômeno envolvido como, por exemplo, movimento, energia e gravidade. A categoria *instrucional* envolve algum grau de instrução, como, por exemplo, os conceitos alternativos existentes sobre átomos que, por serem mais abstratos, inviabilizam sua concepção por meio da experiência diária. Os conceitos alternativos instrucionais refletem conceitos presentes nos livros didáticos ou nas explicações recebidas.

Ainda considerando a origem dos conceitos alternativos, o *Committee on Undergraduate Science Education* (Nakiboglu *et al.,* 2006) propôs a classificação em cinco grupos: noções preconcebidas (*preconceived notions),* crenças não científicas *(nonscientific beliefs),* conceitos mal entendidos *(conceptual misunderstandings),* conceito alternativo vernacular *(vernacular misconceptions)* e conceito alternativo factual *(factual misconceptions).*

- Noções Preconcebidas - são concepções populares incorporadas pelas experiências diárias.

- Crenças Não Científicas - são concepções aprendidas por meio de fontes não científicas, como o ensino religioso e místico.

- Conceitos Mal Entendidos - podem surgir durante a escolaridade, quando são ensinados conceitos científicos de maneira inapropriada,

não colocando em discussão os conceitos alternativos pré-existentes dos alunos.

- Conceitos Alternativos Vernaculares - surgem por meio do uso de palavras que têm um sentido no cotidiano do aluno, mas outro sentido no contexto científico.

- Conceitos Alternativos Factuais - são falsos conceitos frequentemente aprendidos durante a infância e que permanecem inalterados na idade adulta.

Desta classificação apresentada, os conceitos mal entendidos, que surgem da instrução inapropriada, podem estar relacionados com a formação precária de alguns professores e na deficiência da comunicação professor/aluno, pautada em uma transposição didática (ver adiante) inconsistente. Além disso, como a principal fonte de consulta dos professores e alunos é o livro didático, a precariedade da transposição didática feita pelos autores pode contribuir para instalação de conceitos alternativos (Nakiboglu *et al.,* 2006).

Estudos na área de Ensino em Química mostram que muitos estudantes se esforçam para aprender a matéria, porém, muitas vezes, sem sucesso. Uma das possíveis causas desta dificuldade é a não construção apropriada de conceitos fundamentais (Nakhleh, 1992), o que impede o entendimento completo de conceitos mais avançados. Na literatura especializada, um grande número de conceitos alternativos na área de química foi identificado. Esses trabalhos têm mostrado a compreensão que os estudantes possuem sobre

átomos e moléculas (Ben-Zvi *et al.,* 1986; Griffiths *et al* 1992 e Nakhleh, 1992); elementos, compostos e misturas (Ayas *et al.,* 1997); energia de ligação (Galley, 2004), eletroquímica (Sanger, 1997), termodinâmica (Johnstone *et al* 1977) e equilíbrio químico (Cheung, 2009).

Transposição didática

O conceito da Transposição Didática foi inicialmente formulado pelo sociólogo Michel Verret em 1975 (Astolfi, 1997 apud Alves Filho, 2000). Em 1982, Yves Chevallard e Marie Alberte Johsua publicaram um trabalho que analisava as transformações sofridas pelo conceito matemático de distância ao sair do meio acadêmico e chegar à sala de aula. Em 1985, Chevallard publica "La Transposition Didactique" (Chevallard, 1991), obra em que o conceito de transposição didática adquire uma estrutura teórica (Alves Filho, 2000).

A produção de conhecimento origina-se, naturalmente, no trabalho dos pesquisadores e o processo de ensino pretende transferir este conhecimento para os alunos, em diferentes níveis de escolaridade. Esta transferência, entretanto, traz dificuldades. Os conceitos originalmente propostos não podem ser apreendidos pelos estudantes tal como foram formulados e tratados pelos especialistas - uma adaptação deve ser feita. A Transposição Didática é entendida como o processo de reformulação que um conceito deve sofrer ao sair do meio acadêmico e chegar à sala de aula.

Chevallard propôs que o processo de transposição tem como ponto de partida ou de referência o conhecimento produzido pela comunidade científica, o qual ele chamou de "*Saber Sábio"*. Esse conhecimento apresenta-se no ambiente escolar no formato de conteúdo escolar; entretanto, este conteúdo

não é o saber sábio original, isto é, ele não é ensinado no formato em que é produzido no meio científico, nem tampouco é uma mera simplificação deste. O conteúdo didático é o produto de um conjunto de adaptações sofridas pelo saber sábio. Após ser transformado pela Transposição Didática, o saber sábio passa a constituir o "*Saber a Ensinar*", que é entendido como conteúdo escolar ou programa escolar.

O fato do saber a ensinar estar definido no conteúdo escolar ou no livro texto não garante que ele seja apresentado aos alunos desta maneira. Sendo assim pode ser identificada uma segunda Transposição Didática, que transforma o saber a ensinar em o que efetivamente aparece na sala de aula, chamado de "Saber Ensinado".

A Transposição Didática pode ser representada pelas transformações abaixo:

Objeto do saber → Objeto a ensinar → Objeto ensinado

Que fazem relação com o Saber Sábio (objeto do saber), Saber a Ensinar (objeto a ensinar) e Saber Ensinado (objeto ensinado) (Alves Filho, 2000).

Os três saberes, ou níveis, são elaborados em diferentes "nichos" e por diferentes personagens. Esses grupos, que têm em comum sua ligação com um determinado saber, fazem parte de um ambiente a que Chevallard chamou de *noosfera*. Nesse ambiente estão envolvidas pessoas e instituições que influenciam no ambiente educacional.

No processo de Transposição Didática, para prevenir a introdução de conceitos alternativos, há necessidade de que os ensinamentos não constituam meras simplificações. Eles devem ser elaborados, de modo a criar um novo conhecimento, adequado ao nível em que será aplicado.

Franzolin (2007) classificou os distanciamentos encontrados na transposição didática em dois eixos. O *distanciamento vertical*, imposto pela necessidade de adaptação dos conceitos a serem ensinados para diferentes níveis escolares, e o *distanciamento horizontal,* que estabelece a distância do eixo determinado pelo rigorismo. Este último inclui alguma flexibilidade do rigor e é introduzido por quem ensina, constituindo uma estratégia didática. O critério e a forma de adaptação estão subordinados ao Conhecimento Pedagógico do Conteúdo (Shulman, 1987) de quem faz a adaptação.

Marandino (2004) reviu algumas características, já apontadas por Chevallard, encontradas no processo de transposição:

1. Descontemporalização: o saber ensinado é exilado de sua origem e separado de sua produção histórica na esfera do saber sábio.

2. Naturalização: o saber ensinado possui o incontestável poder das “coisas naturais”, no sentido de uma natureza dada, sobre a qual a escola agora espera sua jurisdição.

3. Descontextualização: existe algo invariante (significante) e algo variável no elemento do saber sábio correspondente ao elemento do saber ensinado e, nesse sentido, procede-se através de uma descontextualização dos significantes, seguida de uma

recontextualização em um discurso diferente (até aqui, trata-se de um processo comum e fácil de ser identificado). No entanto, nesse processo, há algo que permanece descontextualizado, já que não se identifica com o texto do saber, com a rede de problemáticas e de problemas no qual o elemento descontextualizado encontrava-se originalmente, modificando dessa forma seu emprego, ou seja, seu sentido original.

4. Despersonalização: o saber considerado em *statu nascendi* está vinculado a seu produtor e se encarna nele. Ao ser compartilhado na academia, ocorre certo grau de despersonalização comum ao processo de produção social do conhecimento, que é requisito para sua publicidade. Porém, esse processo é muito mais completo no momento do ensino, pois cumprirá uma função de reprodução e representação do saber sem estar submetido às mesmas exigências da produtividade.

Para o estudo da Bioquímica, conceitos básicos de química são fundamentais. Entretanto, como foi apresentado acima, já foi descrita uma ampla quantidade de conceitos alternativos nessa área. Alguns conceitos bioquímicos incorretos que têm sua origem em conceitos químicos já foram descritos (Morton et al, 2008; Aledo, 2007). Tendo isso em vista, a investigação de conceitos alternativos em Bioquímica tem se tornado um objeto de estudo importante para o aperfeiçoamento do ensino desta disciplina.

A adenosina trifosfato - ATP

Todos os organismos vivos não estão em equilíbrio. Ao contrário, eles necessitam de um influxo contínuo de energia para manter sua estrutura. O metabolismo é o processo global pelo qual os organismos adquirem e utilizam a energia de que necessitam (Voet, 2006). Essa energia é convertida de maneira eficiente para promover diversos processos celulares, como a biossíntese de moléculas complexas, transporte ativo de substâncias através de uma membrana celular, trabalho mecânico, entre outros. Os organismos conhecidos como *fototróficos* (plantas e algumas bactérias) obtêm a energia que necessitam da luz solar. Já os *quimiotróficos* (a maioria dos microrganismos e todos os animais) adquirem energia oxidando compostos encontrados no meio ambiente (Torres, 2007).

No entanto, a energia proveniente do sol e da oxidação de moléculas não é utilizada de maneira direta na realização de trabalho celular, mas na síntese de um composto intermediário rico em energia, a adenosina trifosfato, o ATP. É a energia encontrada no ATP que será utilizada para promover processos biológicos que consomem energia, podendo-se atribuir a essa molécula um papel central no metabolismo energético.

Além da participação como molécula de alta energia, o ATP pode desempenhar outras funções:

- Regulação da atividade enzimática: O ATP pode regular a atividade enzimática de algumas enzimas. Essa regulação pode ser feita de duas formas distintas; a) modificando a enzima por meio de ligação covalente, como ocorre por intermédio de

proteínas quinases e b) modificando a atividade enzimática por meio de interações não covalentes, efeito conhecido como alostérico (Torres, 2007).

- Mensageiro celular: O ATP e seus produtos, ADP e AMP, estão envolvidos em diversos processos extracelulares, como, por exemplo, a neurotransmissão, coagulação sanguínea e processos inflamatórios (Burnstock, 2006; Gordon, 1986).

Devido à sua importância para manutenção da vida e disseminação de seu papel no metabolismo energético em diferentes níveis de escolaridade, assim como a existência já relatada de conceitos alternativos sobre ligação química e termodinâmica (Galley, 2004; Johnstone *et al* 1977) entre os estudantes, o papel termodinâmico do ATP nos organismos foi escolhido como alvo de estudo para investigação de conceitos prévios.

A remediação

A correção dos conceitos alternativos ou a minimização dos seus efeitos foram propostas por alguns autores. Posner et al. (1982) propõem o modelo do ensino por meio do *conflito cognitivo*. Sua proposta consiste em partir das concepções alternativas dos alunos para, então, confrontá-las com situações conflitivas, e assim promover uma mudança conceitual, entendida como sua substituição por outras teorias mais eficientes, ou seja, mais próximas do conhecimento científico.

> *"O ensino baseado no conflito cognitivo assume a ideia de que é o aluno que elabora e constrói seu próprio conhecimento e que deve tomar consciência de suas limitações e resolvê-las. Nesse enfoque, as concepções alternativas ocupam um lugar central, de maneira que a meta fundamental da educação científica será mudar essas concepções intuitivas dos alunos e substituí-las pelo conhecimento científico" (Pozo, 2009)*

A forma de conseguir essa substituição é mostrar a incompatibilidade e limitações das concepções trazidas pelos alunos e apresentar a eles alternativas mais eficientes.

Mortimer (1996) propõe um modelo alternativo para mudança conceitual, a noção de *perfil conceitual*. Essa noção permite entender a evolução das ideias dos estudantes em sala de aula não como uma substituição de conceitos alternativos por conceitos científicos, mas como a evolução de um perfil de concepções, em que as novas ideias adquiridas no processo de ensino-aprendizagem passam a conviver com as ideias anteriores, sendo que cada uma delas pode ser empregada no contexto conveniente. Por meio dessa noção é possível situar os conceitos dos estudantes num contexto mais amplo

que admite sua convivência com o saber escolar e com o saber científico, permitindo que o estudante tenha consciência das diferentes concepções e que as utilize conforme o contexto.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo responder a pergunta título. Para alcançar esse fim, o projeto foi dividido em três partes:

2.1. Investigar conceitos alternativos relativos ao papel termodinâmico do ATP existentes em um grupo de alunos do ensino médio, graduação e pós-graduação, por meio de testes sobre o conceito pesquisado.

2.2. Analisar como o papel termodinâmico do ATP é abordado em trabalhos de referência (artigos científicos) e livros didáticos de ensino superior e médio. Verificar se existe relação entre os conteúdos apresentados nos livros didáticos e os conceitos alternativos identificados.

2.3. Testar uma intervenção didática e verificar seu efeito por meio de pré e pós-testes.

3. PROCEDIMENTOS

3.1. Investigação de conceitos alternativos do papel termodinâmico do ATP

Com a intenção de detectar concepções referentes ao papel termodinâmico do ATP, foi elaborado um teste consistindo de 16 questões. 14 questões eram constituídas de afirmações que deveriam ser respondidas com uma das três alternativas: **verdadeiro (V)**, **falso (F)** e **não sei (N)** e duas questões de múltipla escolha **(Apêndice 1)**. A elaboração do teste foi baseada na experiência em sala de aula, conversas informais com alunos e na forma como os assuntos são expostos nos livros didáticos. Na elaboração das questões foi levada em conta a linguagem utilizada, de forma que diversas vezes pergunta-se a mesma coisa de maneira diferente, de modo a assegurar a identificação da concepção do aluno sobre o assunto.

Antes de responderem as perguntas, todos os alunos foram informados do intuito da pesquisa e de que a participação seria voluntária e confidencial. Para cada um dos níveis de escolaridade foi escolhida uma amostra não aleatória nem média. Ao contrário, procurou-se testar alunos que estivessem entre os de melhor desempenho escolar, pressupondo que, se nesta amostra fossem detectados conceitos alternativos, seria lícito admitir que estes conceitos também prevaleceriam entre os estudantes de desempenho mais fraco. Os números de participantes em cada nível escolar e o local onde a pesquisa foi feita estão relacionados a seguir:

a. Ensino médio (EM) – Foi selecionado, dentre duas escolas particulares de São José dos Campos – SP (Colégio COC e Colégio Cassiano Ricardo – Anglo), um total de 107 alunos do 3º ano do ensino médio, que possuíam alto

desempenho escolar, tendo em vista estudarem nas classes consideradas mais fortes. Esses alunos responderam as questões de número **1** a **12** e o teste **15.**

b. *Graduação (G)* – Participaram 52 alunos do primeiro ano do curso de Medicina da Universidade de São Paulo (USP), que no final da disciplina de Bioquímica, responderam todas as afirmações (**1** a **14**) e testes (**15** e **16**). O curso de Medicina é um dos mais concorridos do país, portanto para serem aprovados no processo seletivo esses alunos tiveram alto desempenho em Química e Biologia.

c. *Pós-Graduação (PG)* – Participaram 47 alunos do programa de pós-graduação do Departamento de Bioquímica da Universidade de São Paulo, que responderam todas as afirmações (**1** a **14**) e testes (**15** e **16**). Dentre os alunos que participaram da pesquisa, os de pós-graduação são os de formação mais diversificada, pois existem biólogos, farmacêuticos, químicos, biomédicos entre outros. Além disso, a origem desses alunos é variada, podendo ser encontrado alunos de diversas partes do país. Adicionalmente, o grupo inclui alunos que apenas iniciaram sua pós-graduação e alunos prestes a terminar seu doutorado. O fator comum entre eles é que para ingressar no programa de pós-graduação, um programa de excelência (avaliado com nota 7 pela CAPES) , os alunos tiveram nota maior que 5 em uma prova envolvendo Bioquímica e Biologia Molecular .

3.2. Análise dos trabalhos de referência e livros didáticos

A escolha dos livros de ensino médio baseou-se na seleção pelo *Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM/2007),* do governo federal e por serem bastante empregados no ensino médio. Nesse caso os livros envolvidos são de Biologia, já que grande parte do conteúdo de Bioquímica do ensino médio está contida nessa disciplina.

Os livros de ensino superior escolhidos para análise são consagrados nas suas áreas, muitos deles recomendados nos cursos de graduação. O conceito analisado encontra-se, basicamente, nos livros de Bioquímica, porém, em uma forma mais simples, pode ser encontrado em livros de outras disciplinas, como Fisiologia e Microbiologia. Sendo assim, foi feita análise também desses livros, sabendo que são importantes fontes de consulta para professores e alunos.

Os livros analisados estão listados abaixo:

a. Ensino médio (sete livros)

- **Livro 1**: Amabis e Martho – Biologia das Células – 2ªed.
- **Livro 2**: Armênio Uzunian e Ernesto Birner – Biologia 1 - 3ªed.
- **Livro 3**: Avancini e Favaretto – Biologia – Uma abordagem evolutiva e ecológica – 1ªed.
- **Livro 4**: César e Sezar – Biologia 1 – 7ª ed.
- **Livro 5**: Osvaldo Frota – Pessoa – Caminhos da vida I – 1ªed.

- **Livro 6**: Sérgio Linhares e Fernando Gewandsznajder – Biologia Hoje Vol.1 – 6ªed.

- **Livro 7**: Sônia Lopes – Bio. Vol. 1 – 1ªed.

b. Ensino superior (14 livros)

- **Livro 1g:** White, Handler, Smith e Stetten – Principle of Biochemistry – 1959 – McGraw-Hill Book Company, INC.
- **Livro 2g:** Mahler H. R. and Cordes E. H. – Biological Chemistry – 1969 – A Harper International Edition.
- **Livro 3g:** Lehninger A. L. – Bioenergetics – 1965 – W. A. Benjamin. INC.

- **Livro 4g:** Lehninger A. L. – Bioenergetics – 1973 – W. A. Benjamin. INC

- **Livro 5g:** Lehninger A.L. – Bioquímica Volume 2: Catabolismo e a Produção das Ligações de Fosfato – 1982 – Editora Edgard Blucher.

- **Livro 6g**: David L. Nelson and Michael M. Cox – Lehninger – Principles of Biochemistry – 2000 – 3ª edição

- **Livro 7g:** Donald Voet and Judith G. Voet – Fundamentos de Bioquímica – 2002 – Editora Artmed

- **Livro 8g**: Jeremy M. Berg, John L. Tymoczko and Lubert Stryer – Biochemistry – 2007 – 6ª edição

- **Livro 9g**: Mathews and van Holde – Biochemistry – 2ª ed.

- **Livro 10g**: Sue E. Huether; Kathryn L. McCance - Understanding pathophysiology – 4ªed. – Mosby Elsevier

- **Livro 11g**: Bruce Alberts; Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts and Peter Walter – Biologia Molecular da Célula – 4ª ed. Artmed.
- **Livro 12g**: Gerard J. Tortora; Berdell R. Funke; Christine L. Case – Microbiologia – 6ª ed. Artmed.
- **Livro 13g**: Arthur C. Guyton; John E. Hall – Fisiologia Humana e Mecanismos das Doenças – 6ª ed. Guanabara Koogan.
- **Livro 14g**: Harvey Lodish; Arnold Berk; S. Lawrence Zipursky; Paul Matsudaira; David Baltimore; James Darnell – Biologia Celular e Molecular – 4ª ed. Revinter.

3.3. Intervenção didática

Nesta fase do projeto participaram 45 alunos de graduação do primeiro ano de Farmácia – Bioquímica da Universidade de São Paulo. A intervenção ocorreu na disciplina *Bioquímica: estrutura e metabolismo de biomoléculas*, QBQ 0215, fazendo parte das atividades que ocorriam ao longo do curso. O curso de Bioquímica, no qual foi feita a intervenção, tem como foco central o aluno. As atividades são desenvolvidas de forma que o aluno seja um participante ativo do processo ensino-aprendizagem, cabendo ao professor o papel de mediador.

A disciplina é dividida em temas, como, por exemplo, aminoácidos, estrutura de proteínas etc. Dentro de cada tema existem dois períodos: período de estudo e grupo de discussão. No período de estudo os alunos são divididos em pequenos grupos (no máximo com 5 componentes) e têm como atividade responder um conjunto de questões e problemas direcionados para cada tema. Nesse período os alunos leem partes do livro e discutem cada questão com seus pares, com o objetivo de chegar a uma resposta comum. Nesse período o professor e os monitores circulam pela sala para esclarecer possíveis dúvidas.

No grupo de discussão, todos os alunos (no máximo 25) discutirão outros problemas relacionados ao tema do período de estudo anterior. Nessa etapa o professor apenas direciona a discussão, permitindo que o grupo alcance uma solução.

A intervenção didática consistiu de três etapas. Inicialmente (etapa 1) foi feito um pré-teste por meio do questionário constante do **Apêndice 2**, cerca de um mês após o início da disciplina. A seguir (etapa 2), os alunos foram orientados a ler em grupo o texto *O sentido das reações* (capítulo 4, do livro Bioquímica Básica – Marzzoco e Torres 3ª ed.). Após a leitura, as questões do pré-teste

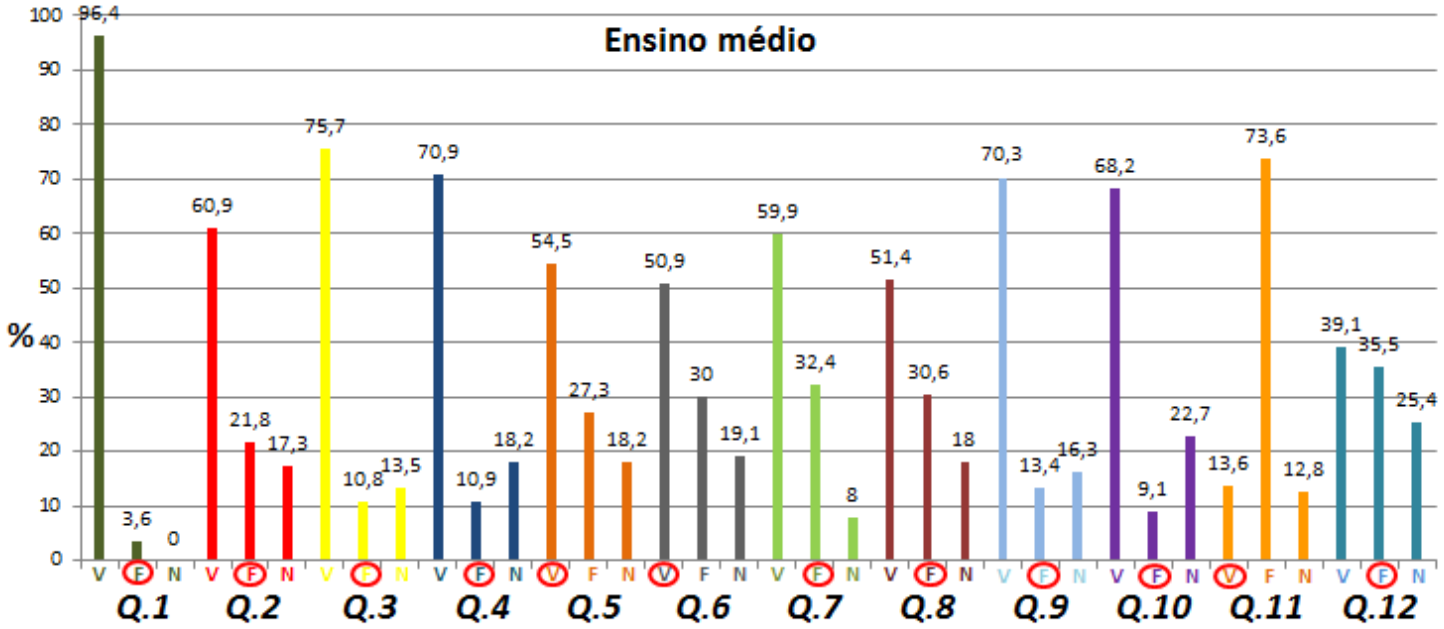
foram discutidas em grupo para verificação dos erros e acertos cometidos. O pós-teste (etapa 3), constante do **Apêndice 3**, foi aplicado aproximadamente três meses depois, sem conhecimento prévio dos alunos e sem que o assunto examinado tenha sido retomado. O intervalo entre os testes foi planejado como uma estratégia para verificar se houve mudanças estáveis sobre o assunto em questão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Investigação dos conceitos alternativos

Alguns conceitos alternativos na área de Bioquímica, detectados por meio de questionários, já foram descritos na literatura (Morton et al; 2008; Oliveira et al; 2003).

Para facilitar a análise dos resultados, primeiramente será apresentado o resultado geral, com as respostas de todas as questões. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente, os resultados dos testes feitos com alunos do Ensino Médio, da Graduação e da Pós-graduação. Em seguida virão os resultados comparativos e suas discussões.



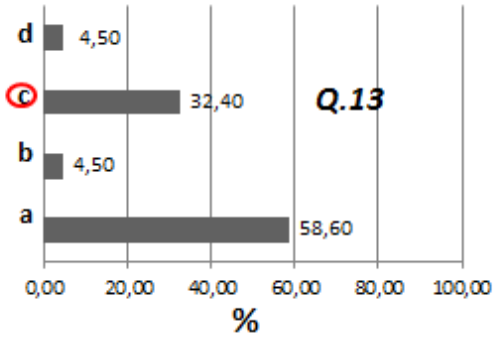


Figura 1 – Respostas dos alunos de Ensino Médio. As respostas circuladas em vermelho são as corretas.

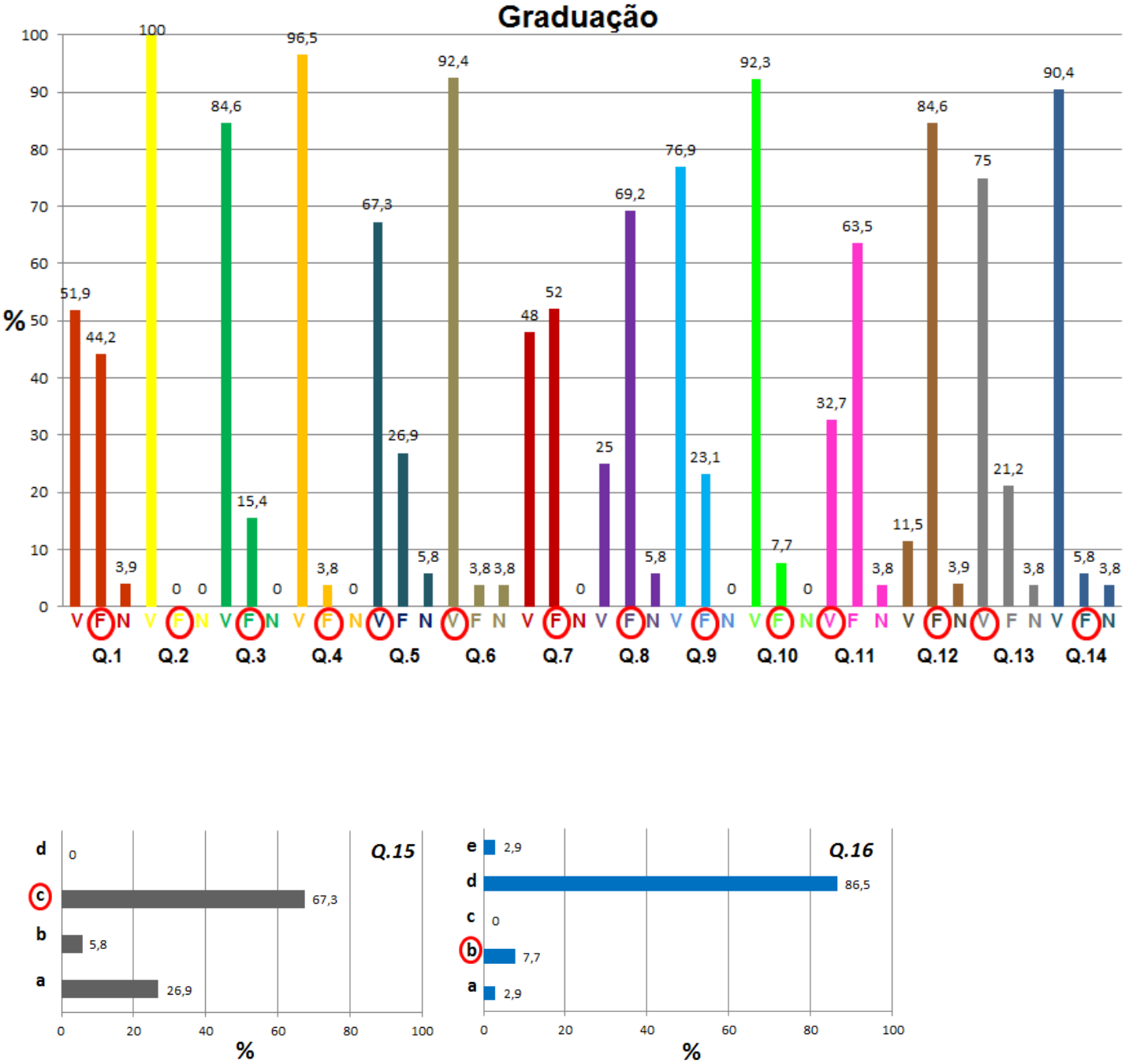


Figura 2 – Respostas dos alunos de Graduação. As respostas circuladas em vermelho são as corretas.

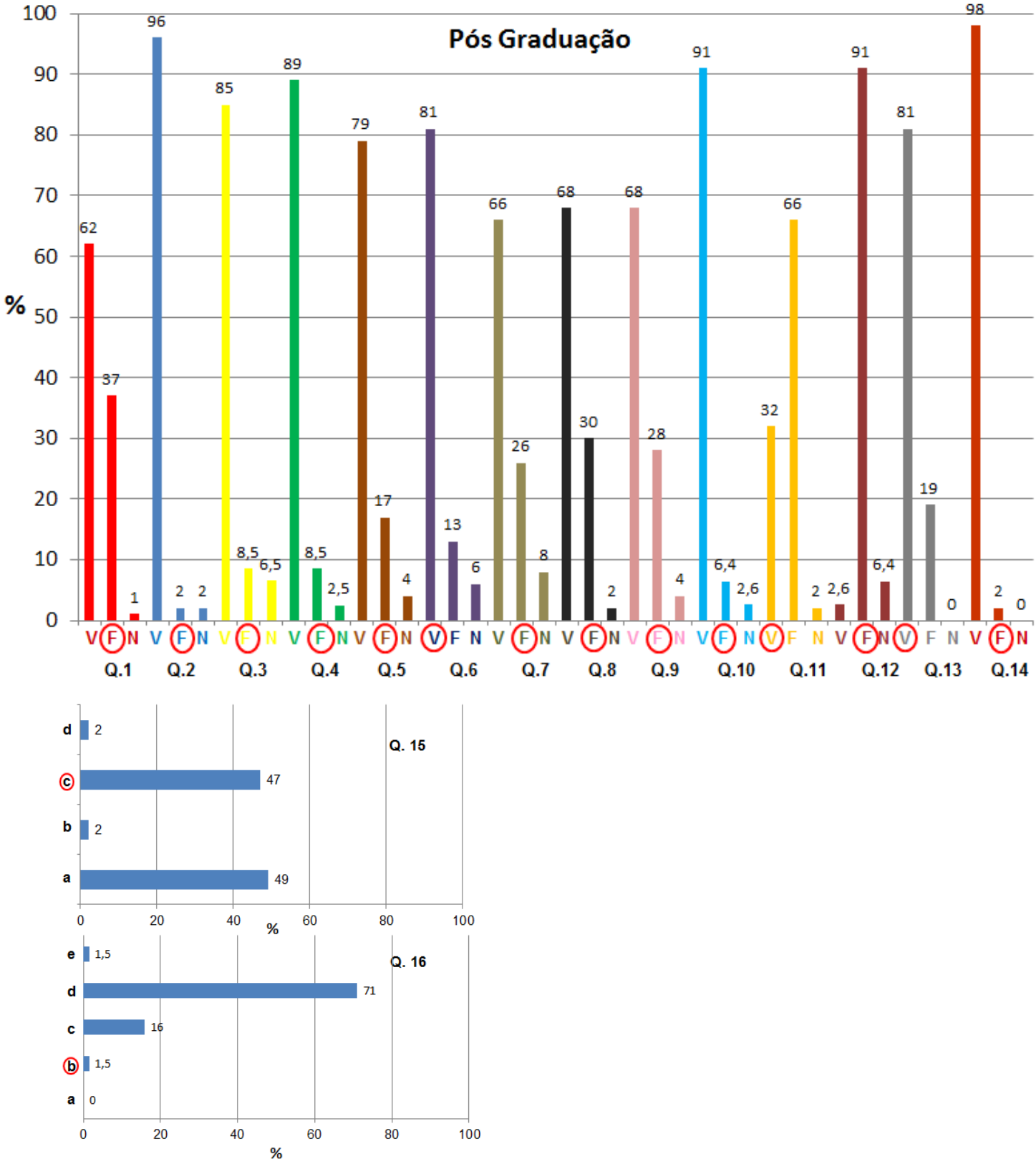


Figura 3 – Respostas dos alunos de Pós-graduação. As respostas circuladas em vermelho são as corretas.

Antes de expor os resultados encontrados é necessário informar que para os alunos do ensino médio é a disciplina de Biologia que trabalha com a Bioquímica, o que inclui o papel do ATP. Nas escolas em que a pesquisa foi feita, esse assunto é trabalhado no primeiro semestre do primeiro e do terceiro ano. Porém, a abordagem do papel desempenhado pelo ATP neste nível não inclui tópicos de termodinâmica, como por exemplo, energia livre. Dessa forma, as questões 14 e 16, que envolviam energia livre, não foram respondidas pelos alunos do ensino médio.

A ligação química é o resultado da atração entre os átomos participantes, e para rompê-la é necessário um investimento de energia (Galley, 2004). As afirmações 1 e 3 tinham o objetivo de investigar esse conceito de maneira geral e quando envolve a ligação fosfato da molécula de ATP.

Afirmação 1: *A quebra de uma ligação química libera energia.*

Afirmação 3:

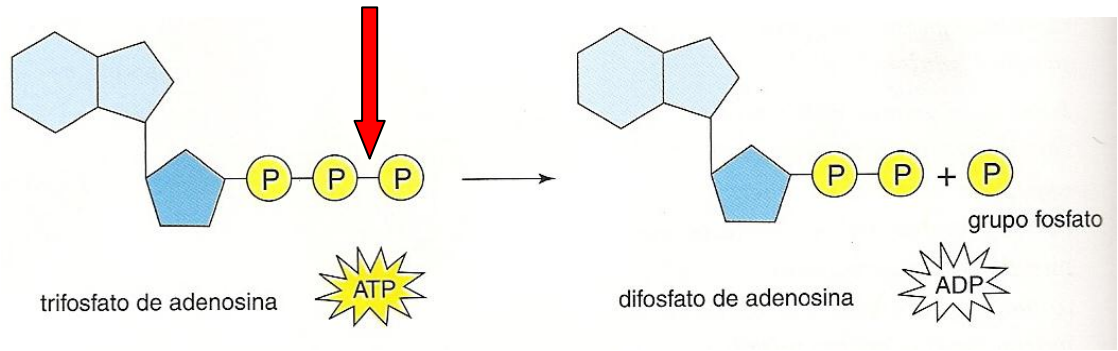


Figura 4 extraída e adaptada do Livro de Biologia: Os caminhos da vida I – Frota O. e Pessoa

A energia liberada pelo ATP resulta da quebra da ligação (P) fosfato, indicada pela seta.

Os resultados encontrados para as duas afirmações estão na tabela 1:

Afirmações	**Ensino médio %**			**Graduação %**			**Pós-Graduação %**		
	Verdadeiro	*Falso*	*Não sei*	*Verdadeiro*	*Falso*	*Não sei*	*Verdadeiro*	*Falso*	*Não sei*
1	96,4	**3,6**	0	51,9	**44,2**	3,9	62	**37**	1
3	70,9	**10,9**	18,2	84,6	**15,4**	0	85	**8,5**	6,5

Tabela 1 – Porcentagens das respostas encontradas para as questões 1 e 3. As respostas em vermelho são as corretas.

Esses resultados mostram que 96,4% dos alunos do ensino médio (EM), 51,9% dos alunos de graduação (G) e 62% dos alunos de pós-graduação (PG) apresentam a concepção de que a quebra de uma ligação química libera energia. Quando a pergunta envolve a quebra da ligação fosfato na molécula de ATP, as porcentagens de concepções erradas entre os alunos de graduação e pós-graduação aumentam para 84,6% e 85%, respectivamente.

Esses dados sugerem a falta de integração entre as disciplinas de Química e Biologia, tendo em vista que o conteúdo da afirmação 1 é estudado na Química enquanto que o conteúdo da afirmação 2 é estudado na Biologia. Essa integração deficiente pode levar o aluno a entender que as moléculas biológicas possuem propriedades diferentes de outras moléculas, tendo parte de suas características não explicadas pela física e química (Barak, 1997 e Öztas, 2009).

Ainda referente ao assunto energia de ligação, o teste nº 15

Assinale a resposta correta.

A energia liberada na reação de hidrólise do ATP

a. é derivada da quebra de ligações

b. é consequência da formação de ligações novas

c. é o saldo das energias liberadas e consumidas nas quebras e formações de ligações dos componentes da reação.

d. é a soma das energias liberadas nas quebras e formações de ligações.

Verifica o entendimento dos alunos quanto à origem do calor liberado na hidrólise do ATP, sendo esse o saldo das energias consumidas e liberadas nas quebras e formações de ligações dos componentes da reação.

O resultado encontrado mostra que 32% dos alunos do EM, 67% dos alunos de G e 47% dos alunos de PG assinalaram a afirmação correta. Porém, uma parte significativa dos alunos nos três níveis de escolaridade (59% EM, 27% G e 49% PG) apontou que a energia liberada na hidrólise do ATP é proveniente da quebra de ligações.

Quando são comparados os resultados das questões 2 e 15, verifica-se que o número de acerto aumenta, mesmo observando que o conteúdo de ambas as questões é o mesmo. Uma possível causa para essa discrepância deve-se à própria questão 15, que deixa explícito o cálculo de entalpia por energia de ligação, podendo levar alguns alunos a assinalar a resposta correta.

A hidrólise do ATP libera calor, que não é utilizado nos processos celulares. Uma reação não espontânea em determinadas condições, não se torna espontânea na presença de ATP. O que ocorre é outra reação em que o ATP é reagente. Esse conteúdo foi investigado nas questões 2, 4, 8, 9, 10, 11,

12, 14 e 16, sendo que as questões 14 e 16 só foram respondidas pelos alunos de graduação e pós-graduação, por envolver energia livre.

As questões estão a seguir e os resultados na tabela 2 e 3.

2. Reações que não ocorrem espontaneamente podem ocorrer com a participação do ATP.

4. A energia liberada pela conversão de ATP em ADP + P é utilizada para promover outras reações celulares.

8. As reações não espontâneas convertem-se em reações espontâneas quando associadas à hidrólise do ATP.

9. A função celular do ATP é fornecer energia, derivada da sua hidrólise.

10. Os processos celulares que requerem energia (síntese de polímeros, transferência de íons e moléculas contra gradiente, etc.) utilizam a energia derivada da hidrólise do ATP.

11. A hidrólise do ATP libera energia como calor, que não pode ser utilizado pelas células.

12. Os processos celulares que requerem energia utilizam a energia térmica proveniente da hidrólise do ATP.

14.

Glicose + fosfato(P) → glicose-6-fosfato $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ *(1)*

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P$ $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ *(2)*

A formação de glicose fosfato pode ser obtida se for associada à hidrólise do ATP.

16. Assinale a resposta correta.

$A + B \rightarrow A\text{-}B$ $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ (1)

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi$ $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ (2)

$A + B + ATP + H_2O \rightarrow A\text{-}B + ADP + Pi$ (3)

Com relação às reações acima se pode afirmar que apenas

a. a reação (1) ocorre.

b. a reação (2) ocorre.

c. a reação (3) ocorre

d. as reações (2) e (3) ocorrem.

e. as reações (1) e a (2) ocorrem.

Afirmações	Ensino médio %			Graduação %			Pós-Graduação %		
	Verdadeiro	*Falso*	*Não sei*	*Verdadeiro*	*Falso*	*Não sei*	*Verdadeiro*	*Falso*	*Não sei*
2	60,9	**21,8**	17,3	100	**0**	0	96	**2**	2
4	70,9	**10,9**	18,2	96,5	**3,8**	0	89	**8,5**	2,5
8	51,4	**30,6**	18	25	**69,2**	5,8	68	**30**	2
9	70,3	**13,4**	16,3	76,9	**23,1**	0	68	**28**	4
10	68,2	**9,1**	22,7	92,3	**7,7**	0	91	**6,4**	2,6
11	**13,6**	73,6	12,8	**32,7**	63,5	3,8	**32**	66	2
12	39,1	**35,5**	25,4	11,5	**84,6**	3,9	2,6	**91**	2,4
14	**-**	**-**	**-**	90,4	**5,8**	3,8	98	**2**	0

Tabela 2 – Porcentagens das respostas encontradas para as questões 2, 4, 8 a 12 e 14. As respostas em vermelho são as corretas.

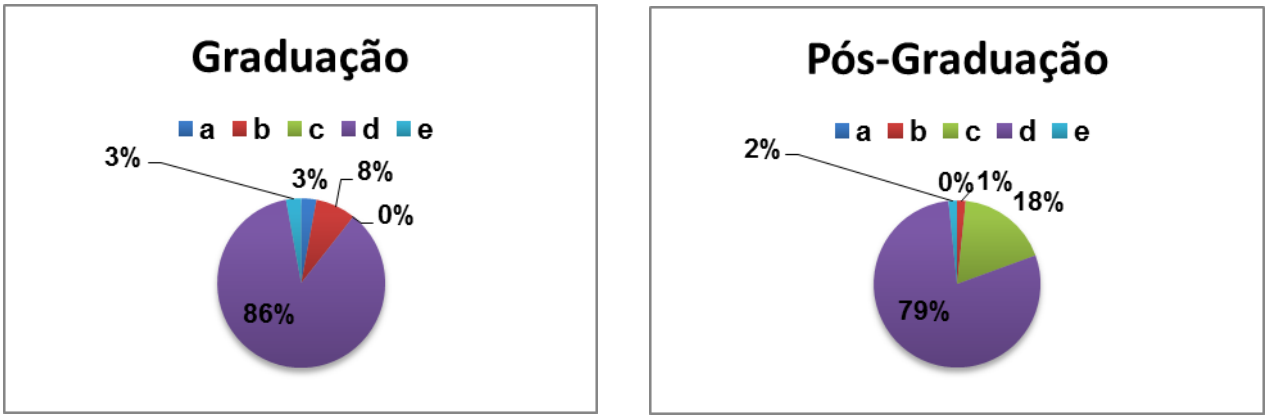


Figura 5 – Porcentagens das respostas encontradas para a questão 16. A alternativa correta é a b.

Os resultados encontrados nas questões 2, 4, 8, 9, 10, 14 e 16 mostram que grande parte dos alunos atribui a ocorrência de processos não espontâneos à hidrólise do ATP. Na **questão 8**, 51,4% dos alunos de ensino médio e 68% dos de pós-graduação consideraram verdadeira a afirmação de que processos não espontâneos convertem-se em espontâneos quando associados à hidrólise do ATP, enquanto que, entre os alunos de graduação, 69,2% consideraram essa afirmação como falsa. Porém, ao analisarmos a **questão 2**, 100% dos alunos de graduação a consideraram verdadeira. Essa contradição pode estar relacionada com a linguagem empregada na questão, ou seja, os alunos de graduação podem ter incorporado alguma expressão ou conceito durante seus estudos e empregado quando perguntado. Entretanto, analisando as respostas das outras questões relacionadas, é possível perceber que não houve incorporação significativa deste conceito.

As questões 11 e 12 trazem informações interessantes. Na questão 11, 73,6% dos alunos de ensino médio, 63,5% dos de graduação e 66% de pós-graduação consideraram falsa a afirmação de que as células não podem utilizar calor em seus processos. Já na questão 12, 35,5% dos alunos de

ensino médio, 84,6% dos de graduação e 91% de pós-graduação consideraram falsa a utilização de energia térmica pelas células. Esses resultados apontam que a maioria dos alunos acredita que as células podem utilizar calor em seus processos. Para os alunos é difícil diferenciar calor e energia térmica (associada à energia cinética e medida por meio da temperatura) como já foi registrado por alguns autores (Pozo et al, 2009). É importante ressaltar que a dificuldade simbólica e de linguagem é um empecilho no aprendizado de ciência. (Lopes, 1996)

A proposta da afirmação 7 foi verificar se os alunos entendem que a mitocôndria apenas transforma uma forma de energia em outra.

Afirmação 7

Uma vez que a maior parte do ATP celular é sintetizado na mitocôndria, pode-se afirmar que esta é uma organela que produz energia.

Os resultados encontrados mostram que 59,9% dos alunos de ensino médio, 48% de graduação e 66% de pós-graduação, consideram a afirmação verdadeira. Esses resultados levantam a suspeita de que existem conceitos alternativos referentes ao papel da mitocôndria, porém é necessário investigar mais o assunto, pois a resposta errada dada pelos alunos pode estar relacionada com o termo “produz energia”. Acredito que nesse caso possa haver uma falta de precisão ao usar o termo, sendo assim, para aprofundar mais a investigação é necessário elaborar mais perguntas sobre o tema.

4.2. Análise dos livros didáticos

Esta dissertação trabalha com a hipótese de que a transposição didática feita para os livros de graduação e ensino médio sobre o papel termodinâmico do ATP poderia contribuir para a instalação e/ou manutenção dos conceitos alternativos identificados. Tendo em vista que o papel do ATP é ensinado na escola e os livros didáticos fazem parte do material de consulta dos professores e alunos, analisar como o conteúdo é exposto pode trazer um indicativo importante sobre a origem das concepções alternativas.

A transposição didática, como foi discutida na introdução, tem como referência a literatura específica, na qual o conhecimento se estabelece. Sendo assim, houve a necessidade de analisar alguns desses trabalhos com o intuito de verificar o distanciamento entre os conteúdos encontrados nos livros didáticos e a literatura de referência. É importante ressaltar que o presente trabalho não está interessado na análise minuciosa desses distanciamentos - horizontais e verticais – (Franzolin, 2007), mas na verificação se o conteúdo, na forma em que é exposto, pode sustentar a existência de conceitos distorcidos.

Os conceitos alternativos identificados no presente trabalho serviram como referência para análise dos livros, já que o intuito da análise era verificar se os conceitos encontrados podem ter sido originados dos livros didáticos.

Primeiramente será apresentado o exame dos livros de graduação e, posteriormente, o dos livros de ensino médio. O motivo dessa escolha foi que os livros de graduação são utilizados como referência para os autores dos livros de ensino médio, o que pode ser verificado por algumas referências encontradas nesses livros.

Antes de analisar os livros de graduação, considerou-se mais apropriado analisar alguns textos de referência para verificar como o papel termodinâmico do ATP é abordado.

Leopoldo de Meis (de Meis, 1993) publicou uma revisão sobre a evolução do conceito de compostos fosfatados ricos em energia. Segundo esse autor, a evolução do conceito pode ser dividida em duas partes. A primeira, que ele chama de “visão clássica”, envolve as primeiras descobertas de compostos fosfatados até o início dos anos 70. A segunda, denominada pelo autor de “A nova visão”, envolve os conhecimentos até meados dos anos 90, data da publicação dessa revisão.

De acordo com o autor, na “visão clássica” a energia de hidrólise de diferentes compostos fosfatados seria determinada somente pela natureza química da ligação entre o grupo fosfato e o restante da molécula, independentemente do fato de o composto encontrar-se em solução ou ligado ao sítio ativo da enzima. Uma vez que o composto fosfatado estivesse ligado à enzima, ele seria hidrolisado e a energia derivada da quebra da ligação de fosfato seria aproveitada pela enzima para realizar trabalho.

A energia livre (estado padrão) envolvida nas reações de hidrólise de algumas ligações P-O, como na glicose-6-fosfato ou monofosfato de adenosina (AMP), é pequena em relação à energia livre padrão envolvida nas reações de hidrólise das ligações P-O do ATP ou P-N da fosfocreatina (Machado, 1998). A comparação das energias livres de hidrólise para os diversos compostos fosfatados fizeram surgir o conceito de “compostos ricos em energia”.

Lipmann F., em uma revisão intitulada "*Metabolic Generation and Utilization of Phosphate Bond Energy"* (Lipmann, 1941), além de idealizar o conceito de compostos fosfatados ricos em energia, cria a definição do termo grupo potencial. De acordo com o autor:

> *"These biologically interesting linkages designed to transfer groups with loss of energy will be called "weak" linkages based on the usual chemical nomenclatures with respect to cleavage processes. If, with cleavage, large amounts of energy can be made free (negative change in free energy), the tendency to burst the linkage is relatively great: thus a weak linkage (small affinity). If little energy is freed with cleavage, or energy has even to be furnished, the linkage is called strong (large affinity). Now, very often the biochemist and likewise the synthetic organic chemist is not interested to talk so much about the energy accumulated in the linkage. Instead of emphasizing the negative, the escape of energy through cleavage, he wants to emphasize the positive, the largeness of the energy present in linkage before cleavage, which determines the group potential, the escaping tendency of the group." (pág. 102 – Lipmann F. 1941)*

A capacidade de transferência do grupo fosfato está na natureza da ligação química.

> *"In three of the four types to be discussed, the high group potential is caused by the anhydric nature of the bond" (pág. 110)*

Sendo assim, ligação fosfatada de alta energia está presente em compostos com alto potencial de transferência do grupo fosfato. Essas ligações consideradas energéticas são representadas por (~).

Segundo de Meis, na época de Lipmann (1941) até final da década de 60, pensava-se que a justificativa para os altos valores de hidrólise dos

compostos fosfatados de alta energia estava nos efeitos intramoleculares. Estruturas de ressonância, repulsão eletrostática e distribuição eletrônica ao longo do esqueleto P-O-P da ligação fosfoanidrido do ATP e pirofosfato seriam responsáveis pela energia envolvida na hidrólise dessas ligações. A participação do solvente, no caso a água, era ignorada.

Em 1970, George *et al* (de Meis, 1993) propuseram que compostos fosfatados em solução aquosa interagem fortemente com o solvente. Segundo eles, as moléculas de água envolvidas na solvatação organizam-se ao redor dos compostos fosfatados blindando suas cargas negativas e assim diminuindo a repulsão eletrostática. Além disso, moléculas de água podem formar pontes entre diferentes átomos do composto e, com isso, reforçar os pontos fracos gerados pela ressonância.

Por essa razão, George *et al* (George, 1970) propuseram que a constante de hidrólise de um composto fosfatado deveria ser determinada pela diferença de energia de solvatação dos reagentes e produtos e não por efeitos intramoleculares. Para eles, moléculas mais solvatadas são mais estáveis e menos reativas, ao contrário das moléculas pouco solvatadas. Portanto, quando a constante de hidrólise de um composto é muito alta, significa que os produtos da reação são mais solvatados que os reagentes.

George e colaboradores mostraram que a energia livre de hidrólise depende da forma iônica da molécula hidrolisada e os valores das energias de solvatação deveria ser uma parte importante na entalpia da reação.

Em 1978, Hayes *et al.* calcularam a energia de hidrólise de alguns compostos fosfatados em fase gasosa e compararam com os valores calculados em solução. Em solução aquosa, as ligações acetil-fosfato e N-P da

fosfocreatina e fosfoarginina possuem alta energia (segundo a definição de Lipmann), porém em fase gasosa isso não era verdade. Os valores de ΔG positivos de hidrólise indicavam que quando não estão solvatados, acetil-fosfato e fosfocreatina são mais estáveis que seus produtos de hidrólise, deste modo, segundo a definição de Lipmann, eles são compostos fosfatados de baixa energia nessas condições.

Hayes e colaboradores concluíram que, como foi proposto por George *et al.* , a energia de solvatação dos reagentes e produtos é o fator mais importante na determinação da energia de hidrólise da fosfocreatina, ATP, PP e acetil fosfato.

A constante de equilíbrio de hidrólise do ATP e de outros compostos que possuem ligação anidrido fosfórico pode variar dependendo do meio e da composição iônica do meio em que a reação se processa. Esta variabilidade dos valores é atribuída à variação de entropia. Em solução aquosa, a constante de equilíbrio possui o mais alto valor, mas em condições similares às encontradas nas superfícies de proteínas este valor é baixo. Com isso, compostos considerados de alta energia em meio aquoso são de baixa energia em outras condições, mostrando que o fator intramolecular é pequeno.

Algumas enzimas estão associadas com a transição da constante de hidrólise de compostos fosfatados. Portanto, elas promovem uma mudança no status dos compostos de: **alta energia para baixa energia**. Após a dissociação da enzima, os produtos da hidrólise do ATP não podem regenerá-lo, pois ao retornarem ao meio aquoso a constante de hidrólise do ATP volta a ter um valor alto. Sendo assim, esse processo não está relacionado com a quebra da ligação anidrido fosfórico.

Essas descobertas promovem uma mudança na forma de pensar o papel do solvente e da enzima na termodinâmica do ATP. de Meis denomina essa mudança de paradigma como “A nova visão”.

4.2.1. Livros de Graduação

4.2.1.a. Livros de Bioquímica.

Durante a análise dos livros foi dada importância para passagens, analogias, esquemas ou figuras que pudessem contribuir para os conceitos alternativos encontrados. Para isso foi verificado como o livro trabalha alguns aspectos do papel termodinâmico do ATP:

I. A energia na molécula do ATP.

II. O papel da hidrólise do ATP e o acoplamento de reações.

Lipmann, em seu trabalho anteriormente citado, atribui à ligação anidrido fosfato a energia proveniente do ATP. Isso foi estabelecido pelo que era conhecido na sua época, em que a variação de entalpia na hidrólise do ATP era praticamente a variação da energia livre dessa reação, já que o fator entrópico era considerado muito pequeno para ser computado. (Lipmann, 1941 e de Meis, 1993). Essa aproximação está relacionada com a metodologia (calorimetria) utilizada para calcular o calor de combustão e a hidrólise desse composto.

> *“ In these measurements it was assumed that heat and free energy were equivalent” (de Meis, L. 1993, pág 288)*

"In the present case the following discussion will show that corroborative evidence can be brought forward for an approximate equivalence of heat and free energy" (Lipmann F. 1941, pág 105)

Todos os livros de Bioquímica analisados expõem explicitamente que a energia livre liberada na hidrólise do ATP não está na ligação química anidrido fosfato, como era aceito na época de Lipmann.

"The relatively high potential energy which is made available on hydrolysis is a property of the structure of the phosphate compound as a whole and not exclusively of the oxygen-phosphate bond." (White et al, 1959 – pág 353)

As edições analisadas do Lehninger (1965, 1973, 1982 e 2000) estabelecem a diferença entre o conceito de energia de ligação fosfato, usado pelos bioquímicos, e o conceito físico-químico de energia de ligação.

"The high-energy phosphate bond – A misnomer

Those phosphorylated compounds having a relatively high free energy of hydrolysis, such as ATP, phosphocreatine, and phosphopyruvate, are often spoken of having high-energy phosphate bonds, and such bonds are universally designated by the symbol ~ P. These expressions have been very useful and handy to biochemists, but they can be very misleading to the beginner." (Lehninger, 1965 – pág 57)

"The term "high-energy phosphate bond", long used by biochemists to describe the P – O bond broken in hydrolysis reactions, is incorrect and misleading as it wrongly suggests that the bond itself contains the energy. In fact, the breaking of all chemical bonds requires an input of energy" (Lehninger, 2000 – pág 504).

Para todos os livros de bioquímica analisados, a energia livre liberada durante a hidrólise do ATP se deve à mudança de sua estrutura, como pode ser observado no seguinte trecho:

> *"A estabilização por ressonância da ligação fosfoanidrido é menor do que a dos seus produtos de hidrólise. ...*
>
> *O efeito desestabilizante da repulsão eletrostática entre os grupos carregados do anidrido fosfórico, em comparação com os produtos de hidrólise. Na faixa de pH fisiológico, o ATP tem de 3 a 4 cargas negativas, cujas repulsões eletrostáticas mútuas são parcialmente aliviadas pela hidrólise do ATP". (Voet, 2002 – pág 362)*

Os livros mais recentes (Voet, Lehninger 1982 e 2000, Stryer e van Hold) acrescentam a energia de solvatação como também um fator que colabora para o $\Delta G^{0'} << 0$ da hidrólise do ATP.

> *"Outra influência desestabilizadora, difícil de ser percebida, é a menor energia de solvatação do anidrido fosfórico quando comparada aos seus produtos de hidrólise. Algumas estimativas indicam que esse fator fornece a força termodinâmica predominante que impulsiona a hidrólise do anidrido fosfórico" (Voet, 2002 – pág 362)*

Os livros mais antigos (Mahler, White, Lehninger 1965 e 1972) não exploram esse último fator, pois a importância da energia de solvatação na termodinâmica do ATP estava em estudo enquanto as edições desses autores foram lançadas.

A representação (~) utilizada no trabalho do Lipmann para designar a ligação cuja hidrólise possui um valor de $\Delta G'^{o}$ muito negativo, aparece com

mais frequência nos livros mais antigos (Mahler, White, Lehninger 1965 e 1972).

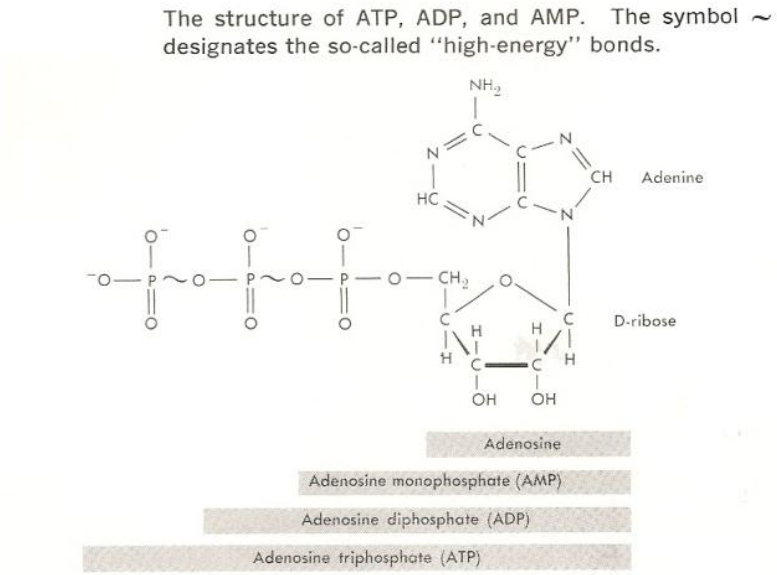


Figura 6: Representação da estrutura do ATP. Lehninger, 1965 – pág 52.

Nos livros mais recentes (Voet, Lehninger 1982 e 2000, Stryer e van Hold) existe apenas uma indicação dessa representação, mas sem figuras indicando-a. O que sugere uma preocupação com essa representação, que pode levar o aluno a entender que a energia se encontra na própria ligação.

Analisando de maneira geral, todos os livros atribuem que a energia livre ($\Delta G'^{o} < 0$) da hidrólise do ATP está associada à reação química e à facilidade em que o ATP transfere seu agrupamento fosfato para a água, apesar que, de forma isolada, podem-se encontrar trechos do tipo:

"A importância biológica do ATP reside na grande quantidade de energia livre que acompanha a quebra das suas ligações fosfoanidridos" (Voet, 2002 – pág 362)

"Os compostos fosfatados de alta energia, cuja função é armazenar a energia da ligação fosfato, são frequentemente denominados de fosfagênios." (Lehninger, 1982 – pág 292)

Pode-se ainda encontrar, no livro do van Hold, o esquema:

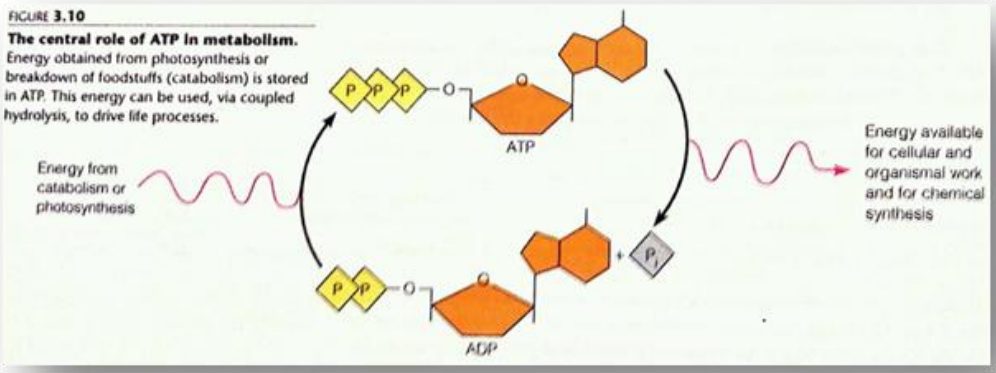


Figura 7: Esquema ilustrando a relação entre a saída do grupo fosfato do ATP com energia. van Hold – pág 78

II. O papel da hidrólise do ATP e o acoplamento de reações.

A hidrólise do ATP, assim como a de outros compostos fosfatados, foi utilizada como parâmetro para comparar a facilidade de transferência do grupo fosfato para outras moléculas. Lipmann utilizou os valores de energia livre da hidrólise desses compostos para definir o termo grupo potencial e com ele o conceito de compostos fosfatados de alta e baixa energia.

Os livros colocam a reação de hidrólise dos compostos fosfatados como forma de classificação desses compostos, como foi feito por Lipmann (Lipmann F., 1941).

"The standard free energies of hydrolysis provide a convenient means of comparing the phosphoryl-transfer potential of phosphorylated compounds." (Stryer – pág 416)

"Os valores de $\Delta G'^{o}$ da hidrólise da vários compostos fosforilados de importância bioquímica estão apresentados na Tabela (não consta). Os valores negativos, geralmente chamados de ***potencial de transferência de grupos fosfatos****, são uma medida da tendência dos compostos fosforilados em transferir seus grupos fosfato para a água." (Voet – pág 362)*

"Biochemists for a long time have loosely classified the various phosphorylated compounds found in the cell into two groups, the so-called high-energy compounds and the low-energy compounds. However, these terms have lost some of their meaning as more complete data on free energies of hydrolysis became available." (Lehninger, 1965 – pág 58)

"É preciso esclarecer, em princípio, que os compostos biológicos de fosfato sofrem, normalmente, reações simples de hidrólise; a escolha da água como o fator-padrão de fosfato para efeitos de uma comparação termodinâmica é totalmente arbitrária." (Lehninger, 1982 – pág 288)

O acoplamento de reações já recebeu algumas críticas em relação à forma simplificada em que esse assunto é apresentado nos livros didáticos, podendo induzir a formação de conceitos alternativos (Aledo, 2006; Spencer, 1992). A simplificação citada por Aledo e Spencer está na forma em que o acoplamento é justificado: uma reação endergônica procede quando acoplada a uma reação exergônica contanto que o processo geral, representado pela soma dos $\Delta G'^{o}$ de cada reação, seja negativo. O trecho abaixo extraído do Stryer (pág – 411) exemplifica essa simplificação:

"An important thermodynamic fact is that the overall free-energy change for a chemically coupled series of reactions is equal to the sum of the free-energy changes of the individual steps. Consider the following reactions:

$$A \rightleftharpoons B + C \quad \Delta G^{o\prime} = +21 kJ\ mol^{-1}$$
$$B \rightleftharpoons D \quad \Delta G^{o\prime} = -34 kJ\ mol^{-1}$$
$$A \rightleftharpoons C + D \quad \Delta G^{o\prime} = -13 kJ\ mol^{-1}$$

Under standard conditions, A cannot be spontaneously converted into B and C, because $\Delta G^{o\prime}$ is positive. However, the conversion of B into D under standard condition is thermodynamically feasible. Because free-energy changes are additive, the conversion of A into C and D has a $\Delta G^{o\prime}$ of -13kJ mol^{-1}, which means that it can occur spontaneously under standard conditions. Thus, a thermodynamically unfavorable reaction can be driven by a thermodynamically favorable reaction to which it is coupled."

A forma em que o acoplamento é abordado, relacionando uma reação endergônica com a hidrólise do ATP ou mesmo com a contração muscular, pode contribuir para um entendimento alternativo do processo. Os livros analisados, apesar da preocupação em deixar explicito o papel da hidrólise do ATP (parâmetro termodinâmico ou para que o ATP desacople da enzima) apresentam trechos que podem levantar uma interpretação errada do processo. Vale a pena ressaltar nesse ponto que a dificuldade encontrada pelos alunos começa no entendimento de conceitos básicos de termodinâmica, ou até no próprio conceito de energia (Coelho, 2009).

Alguns trechos referentes à hidrólise promovendo processos endergônicos.

"The free energy derived from the ultimate hydrolysis of the pyrophosphate linkages of ATP is then available, in a coupled enzymatic reaction to drive an otherwise unfavorable reaction more nearly toward completion. The fundamental role of the hydrolysis of ATP as the driving force for biochemical processes was first clearly recognized by Lipmann" (Mahler – pág 326)

"If we now dissect this sequence of reactions to analyze the energy exchanges, we can see that the energy-yielding process is the hydrolysis of ATP and the energy-requiring process is the formation of sucrose:

$ATP^{4-} + H_2O \rightarrow ADP^{3-} + HPO_4^{--} + H^+ \qquad \Delta G' = -7000$

$glucose + frutose \rightarrow sucrose + H_2O \qquad \Delta G' = -5500$

These processes do not take place independently as written but in the form of the coupled which then have a net decline in free energy of 1500cal/mol." (Lehninger, 1965 – pág 66)

4.2.1.b. Outros livros de graduação.

O papel termodinâmico do ATP é apresentado com mais detalhes nos livros de bioquímica, em que também são apresentados conceitos básicos de termodinâmica. Outros livros utilizados pelos alunos na graduação também apresentam o papel do ATP, porém de uma maneira simplificada. O que pode levar à manutenção de conceitos alternativos.

Logo abaixo serão apresentados os livros analisados seguidos de alguns trechos:

Understanding pathophysiology – Sue E. Huether; Kathryn L. McCance – 4ªed. – Mosby Elsevier

"Role of Adenosine Triphosphate

For a cell to function, it must be able to extract and use the chemical energy in organic molecules. When 1 mole glucose metabolically breaks down in presence of oxygen into carbon dioxide and water, 686 kilocalories (kcal) of chemical energy are released. The chemical energy lost by one molecule is transferred to the chemical structure of another molecule by an energy-carrying or transferring molecule, such as ATP. The energy stored in ATP can be used in various energy-requiring reactions and in the process is generally converted to adenosine diphosphate (ADP) an inorganic phosphate (Pi)…"

Bruce Alberts; Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts and Peter Walter – Biologia Molecular da Célula – 4ª ed. Artmed

No subtítulo: "Os nucleotídeos são as subunidades do DNA e do RNA", pode-se encontrar o trecho "O ATP é formado por reações impelidas pela energia que é liberada na degradação oxidativa dos alimentos. Seus três fosfatos estão ligados em série por meio de duas ligações anidrido fosfóricos, que, ao serem rompidas, liberam grande quantidade de energia útil. O grupo fosfato terminal é geralmente liberado por hidrólise, frequentemente transferindo o fosfato para outra molécula e liberando energia para as reações biossintéticas que necessitam de energia."

Gerard J. Tortora; Berdell R. Funke; Christine L. Case – Microbiologia – 6ª ed. Artmed

O livro apresenta a seguinte figura:

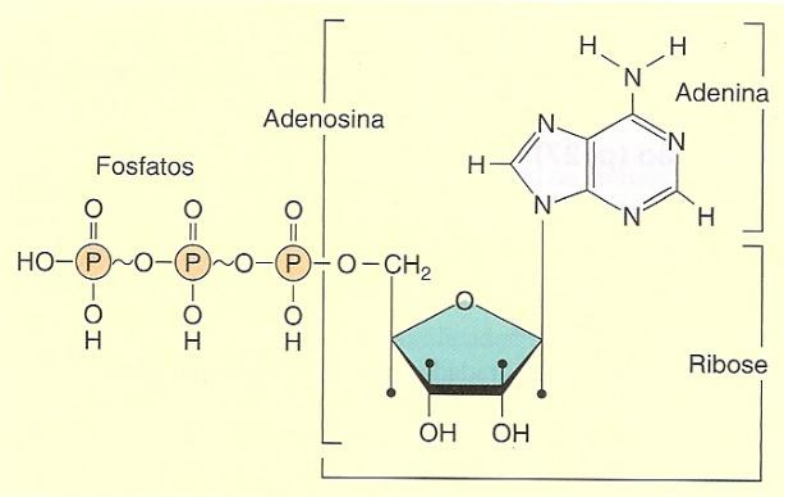


Figura 8: Esquema da estrutura do ATP. Legenda original do livro: “A estrutura do ATP. As ligações de fosfato de alta energia são indicadas por linhas curvas. Quando o ATP se degrada em ADP e fosfato inorgânico, grande quantidade de energia química é liberada para uso em outras reações químicas.”

O livro traz um pequeno tópico discutindo o papel termodinâmico do ATP, destacando o trecho abaixo:

“O ATP é denominado uma molécula de alta energia, pois libera grande quantidade de energia utilizável quando perde seu grupo fosfato terminal para se tornar ***difosfato de adenosina (ADP).*** *Essa reação pode ser representada como segue:*

$$ATP + H_2O \rightleftharpoons ADP + P + energia$$ *“*

Arthur C. Guyton; John E. Hall – Fisiologia Humana e Mecanismos das Doenças – 6ª ed. Guanabara Koogan

" ...pode-se verificar que o ATP é uma combinação de adenina, ribose e três radicais de fosfato. Os dois últimos radicais de fosfato estão ligados ao restante da molécula pelas denominadas ligações ricas em energia, indicadas pelo símbolo ~. A quantidade de energia livre existente em cada uma destas ligações ricas em energia por mol de ATP é de cerca de 7300 calorias por mol em condição padrão, porém atinge 12000 calorias nas condições de temperatura e concentrações dos reagentes no organismo. Por conseguinte, a remoção de cada um dos dois últimos radicais de fosfato libera 12000 calorias de energia."

Harvey Lodish; Arnold Berk; S. Lawrence Zipursky; Paul Matsudaira; David Baltimore; James Darnell – Biologia Celular e Molecular – 4ª ed. Revinter

"Uma reação química desfavorável pode ocorrer se ela estiver associada a uma reação energeticamente favorável. Muitas reações químicas nas células são energeticamente desfavoráveis ($\Delta G > 0$) e não acontecerão espontaneamente. Um exemplo é a síntese de pequenos peptídios ou proteínas a partir de aminoácidos. As células são capazes de realizar uma reação que tenha uma ΔG positiva ligando-se a uma reação que tenha uma ΔG negativa de grande magnitude, de modo que a soma das duas reações tenha uma ΔG negativa. Suponhamos que a reação

$$A \rightleftharpoons B + X$$

Tenha uma $\Delta G^{o'}$ de 5kcal/mol e que a reação

$$X \rightleftharpoons Y + Z$$

Tenha uma $\Delta G^{o'}$ de – 10kcal/mol. Na ausência da segunda reação, haverá muito mais equilíbrio em A que em B. A ocorrência de um segundo processo, pelo qual X se torna Y + Z, muda esse resultado: por ser uma reação favorável, ela realizará o primeiro processo para a formação de B e o consumo de A.

A $\Delta G^{o'}$ da reação total será a soma dos valores $\Delta G^{o'}$ de cada uma das duas reações parciais:

$$A \rightleftharpoons B + X \qquad \Delta G^{o'} = +5 kcal/mol$$

$$X \rightleftharpoons Y + Z \qquad \Delta G^{o'} = -10 kcal/mol$$

$$A \rightleftharpoons B + Y + Z \qquad \Delta G^{o'} = -5 kcal/mol$$

A reação total libera energia. Nas células, as reações energeticamente desfavoráveis do tipo A $\rightleftharpoons$ B + X são frequentemente associadas à hidrólise do composto adenosina trifosfato (ATP), uma reação com uma mudança negativa na energia livre ($\Delta G^{o'}$ = - 7,3kcal/mol), de modo que a reação toda tenha $\Delta G^{o'}$ negativa“

O último livro analisado apresenta uma introdução à termodinâmica, trabalhando com mais detalhes o papel do ATP.

4.2.2. Livros de Biologia do Ensino Médio

Para análise dos livros de Ensino Médio foram criados 5 critérios com o intuito de verificar a forma de apresentação dos conceitos ligados à termodinâmica do ATP:

I. Definição de processos endergônicos e exergônicos

II. Localização da energia do ATP

III. Como o ATP é utilizado

IV. Referência ao acoplamento de reações

V. Presença de esquemas

As tabelas 4, 5, 6, 7 e 8 mostram uma visão geral do que foi encontrado na análise dos livros do ensino médio.

Tabela 4	**I - Definição de processos endergônicos e exergônicos**
Livros 1 e 4	Processo endergônico como sinônimo de endotérmico e exergônico como sinônimo de exotérmico.
Livro 5	Reação exergônica libera energia e endergônica absorve energia.
Livro 7	Utiliza-se apenas do termo endotérmico e exotérmico para representar absorção e liberação de energia, respectivamente.
Livros 2, 3 e 6	Não traz nenhum comentário

Tabela 5	**II – Localização da energia no ATP**
Livros 1, 2, 4, 6 e 7	Energia armazenada nas ligações químicas entre os grupos fosfatos
Livro 3	Mostra que a energia é armazenada quando ocorre a incorporação de um fosfato ao ADP
Livro 5	Comenta apenas que o ATP é uma molécula energética

Tabela 6	III – Como o ATP é utilizado
Livros 1,5 e 6	Energia proveniente da transferência de um grupo fosfato do ATP para outras moléculas
Livros 2 e 4	Desligamento do grupo fosfato do ATP libera energia
Livros 3 e 7	Energia é liberada da hidrólise do ATP

Tabela 7	IV – Referência ao acoplamento de reações
Livros 1 e 5	Faz referência a reações acopladas, mostrando que a energia perdida em uma reação endergônica é utilizada para promover processos exergônicos.
Livro 2	Faz referência a reações acopladas, mostrando que a transferência de energia ocorre por meio de liberação de prótons e elétrons
Livros 3, 4 e 6	Faz referência a reações acopladas, mostrando que o ATP é o elo entre processos que liberam e os que absorvem energia
Livro 7	Faz referência a reações acopladas, mostrando que a energia perdida em uma reação exotérmica é utilizada para promover processos endotérmicos

Tabela 8	V – Presença de esquemas
Livros 1, 4 e 5	Presença de um esquema que mostra a energia sendo liberada na quebra do ATP
Livro 2	Presença de dois esquemas: um que mostra a energia sendo liberada na quebra do ATP e outro que mostra a energia de hidrólise do ATP nas suas ligações
Livro 3	Presença de um esquema mostrando a energia proveniente de moléculas orgânicas utilizadas para promover a união do ADP + P, ATP se transformando em ADP + P e a energia sendo utilizada para realizar trabalho celular
Livro 6	Presença de um esquema mostrando o ATP sendo utilizado para promover alguns processos celulares
Livro 7	Presença de dois esquemas: um mostrando a energia sendo liberada na quebra do ATP e outro que apresenta processos exotérmicos promovendo processos endotérmicos

Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8 – Apresentam uma visão geral do que foi encontrado na análise dos livros de Ensino Médio de acordo com alguns critérios estabelecidos, enunciados no início de cada tabela.

I.Definição de processos endergônicos e exergônicos

Uma reação é exergônica ($\Delta G^{o'} < 0$) quando ela tem uma tendência de ocorrer no sentido direto e endergônica ($\Delta G^{o'} > 0$) quando a tendência é ocorrer no sentido inverso. Uma reação exotérmica é aquela que libera calor para o ambiente, enquanto que endotérmica é aquela que absorve calor.

Em relação a esse critério, em alguns livros foram encontrados erros conceituais importantes.

O exemplo que vem a seguir, além de considerar endergônica e exergônica como sinônimos de endotérmica e exotérmica respectivamente, trás conceitos errados a respeito da energia de ligação.

> *"Nas reações químicas ocorrem quebras de ligações entre átomos nas moléculas reagentes e a sua reassociação em novas combinações, formando as moléculas dos produtos. Em certos tipos de reação, a quantidade total de energia presente nas ligações químicas dos produtos é maior do que a que existia nas ligações que existia entre os átomos dos reagentes. Isto significa que, para esse tipo de reação ocorrer, deve haver adição de energia ao sistema a partir de alguma fonte externa; em outras palavras, a reação absorve energia do ambiente. Por isso, reações desse tipo são denominadas endergônicas ou endotérmicas. Em outros tipos de reação ocorre o inverso; a quantidade total de energia presente nas ligações químicas dos produtos é menor do que a que existia nas ligações entre os átomos dos reagentes. Nesse caso, a reação libera energia para o ambiente, sendo por isso chamada de exergônica ou exotérmica." (Amabis – pág 204)*

> *"Reações desse tipo liberam energia, que pode ser transformada em outros tipos de energia e utilizada. São reações chamadas exotérmicas ou, ainda, exergônicas. Reações que absorvem energia, ao contrário, como na figura da direita, são ditas endotérmicas ou endergônicas." (César – pág 207)*

A figura 9, a que o texto faz referência é:

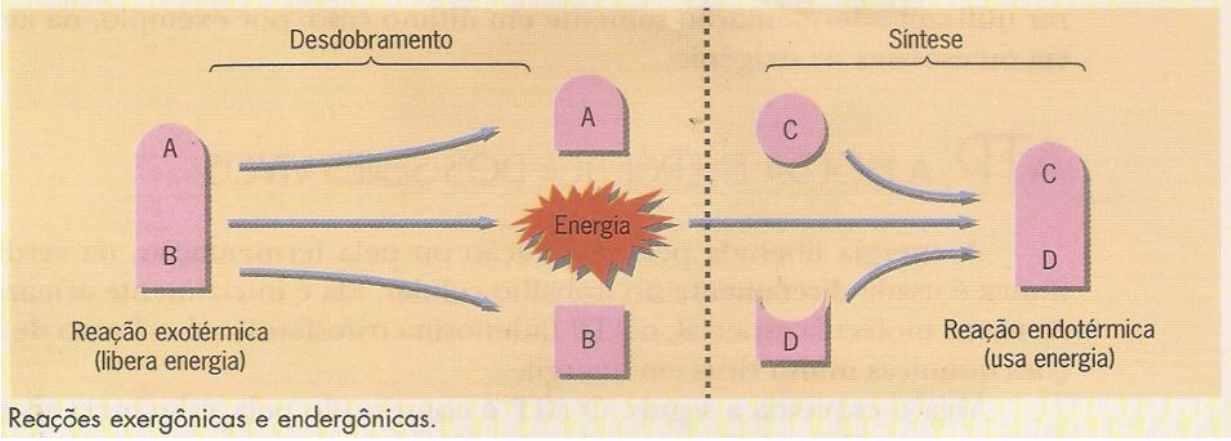


Figura 9 – O esquema mostra um processo exotérmico favorecendo um processo endotérmico. Logo abaixo da figura aparece uma legenda denominando os processos como exergônico e endergônico.

II. Localização da energia do ATP

A maioria dos livros de ensino médio analisados atribui a energia do ATP à ligação anidrido fosfato.

> *"As ligações químicas entre os fosfatos do ATP são ligações de alta energia e representadas graficamente pelo símbolo ~. Durante a degradação de moléculas orgânicas do alimento, parte da energia liberada pelos elétrons é utilizada para síntese de moléculas de ATP, ficando armazenada nas ligações químicas entre seus grupos fosfatos." (Amabis – pág 207)*

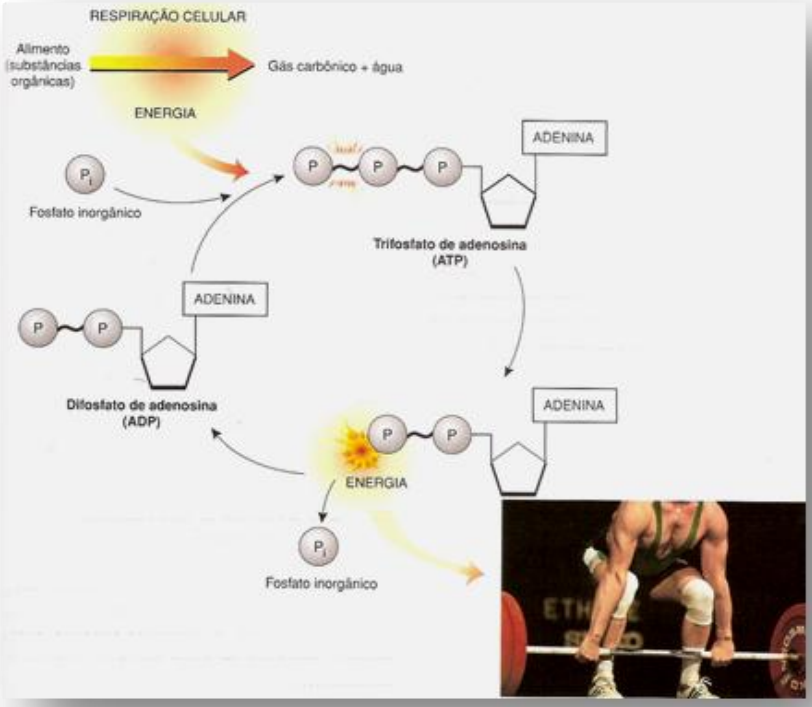


Figura 10 – O esquema mostra a energia proveniente da oxidação de alimentos sendo utilizada na formação do ATP e também mostra a energia sendo liberada na saída do fosfato inorgânico. Amabis – pág 209

"As ligações que mantêm o segundo e o terceiro radicais fosfatos presos no ATP são altamente energéticas (cerca de 7kcal/mol de substância). Assim, cada vez que o terceiro grupo fosfato se desliga do conjunto, ocorre a liberação de energia que o mantinha unido ao ATP" (Armênio – pág 248)

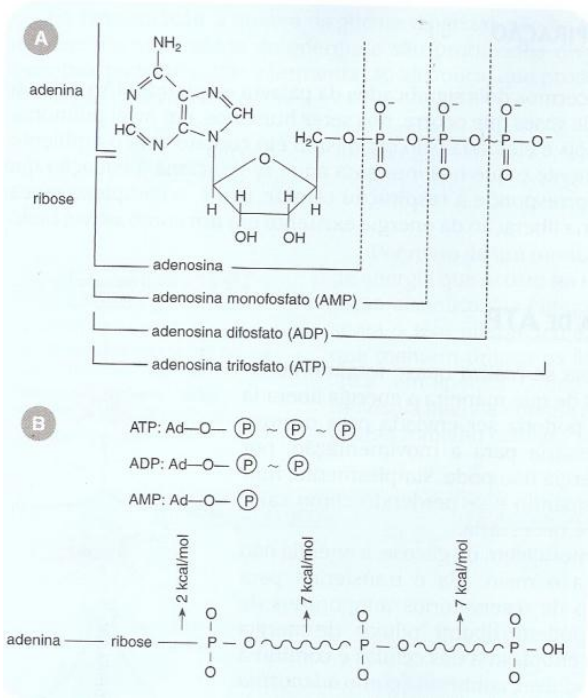


Figura 11 – O esquema destaca a energia das ligações anidrido fosfórico (~). Armênio – pág 248

"A energia liberada pela respiração ou pela fermentação, na verdade, nunca é usada diretamente no trabalho celular. Ela é inicialmente armazenada numa molécula especial, o ATP, sob a forma de ligações químicas muito ricas em energia." (César – pág 208)

"Os grupos de fosfato estão ligados entre si por ~ (convencionou-se usar o símbolo ~ para ligações químicas com grande quantidade de energia). No caso do ATP, as ligações equivalem a 8 mil calorias por mol, aproximadamente. Veja, no esquema, que o ATP pode perder um grupo fosfórico e transformar-se em ADP, liberando energia." (César – pág 209)

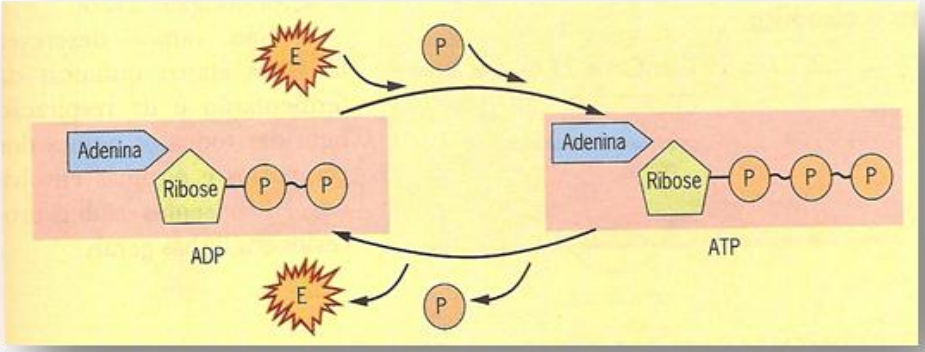


Figura 12 – O esquema mostra a energia sendo utilizada na formação do ATP e também mostra a energia sendo liberada na saída do fosfato inorgânico. A legenda encontrada para essa figura no livro em que ela foi extraída é “Papel do ATP e do ADP no armazenamento de energia”.

“O ATP apresenta entre os radicais fosfatos duas ligações altamente energéticas, representada pelo símbolo ~. Nessas ligações fica armazenada grande parte da energia desprendida pelas reações exotérmicas. Essas ligações podem ser quebradas por hidrólise, liberando energia que pode ser usada para promover reações endotérmicas.” (Lopes – pág 154)

III. Como o ATP é utilizado

O resultado do questionário mostra que a maioria dos alunos acredita na hidrólise do ATP como promotora de processos celulares, porém, apenas dois livros do ensino médio admitem isso.

“Na realização de qualquer trabalho, a energia usada pela célula vem da hidrólise do ATP:

ATP + H_2O → ADP + Fosfato + Energia” (Avancini – pág 172)

IV. Acoplamento de reações

O tema acoplamento de reações aparece de maneira discreta, muitas vezes não aparecendo o nome “acoplamento de reações”. O livro 7 trás um subtítulo referente a esse conceito, apresentando o seguinte esquema:

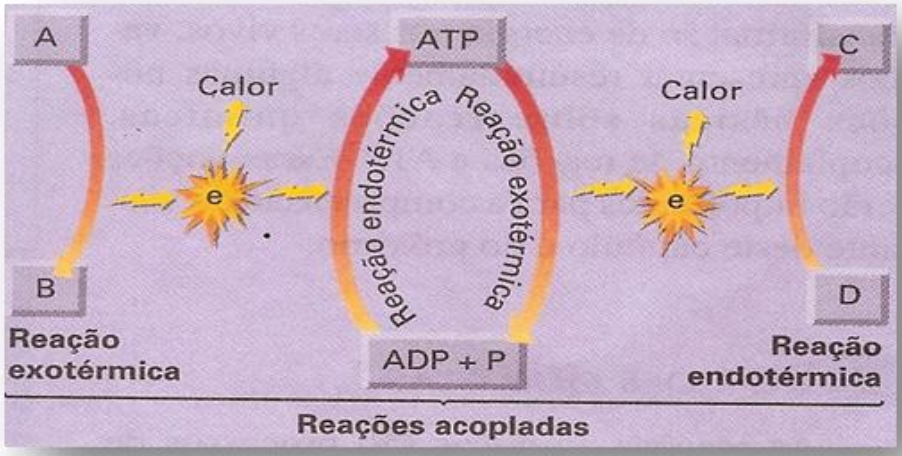


Figura 13 – Esquema referente ao acoplamento de reações. Lopes – pág 154

O primeiro contato dos alunos (em média com 14 e 15 anos de idade) com a bioenergética geralmente acontece no primeiro semestre do primeiro ano do ensino médio, no curso de Biologia. Esse assunto, para os alunos do ensino médio que responderam o questionário, foi repetido no inicio do terceiro ano. Dessa maneira pode-se dizer que os conceitos alternativos apresentados pelos alunos teve sua origem na escola.

Nesse período, assim como nos períodos subsequente de formação escolar (graduação e pós-graduação), a principal fonte de informação referente à termodinâmica do ATP é o professor e o livro didático. Sendo esse último a principal ou a única fonte de referência para o professor de ensino médio (King, 2009; Langhi, 2007).

Os conceitos alternativos identificados pelo questionário mostram certa correspondência com o que foi encontrado nos livros, principalmente os de ensino médio.

Dos alunos que responderam o questionário, mais de 70% acreditam que a quebra da ligação fosfato do ATP libera energia. Esse resultado pode estar relacionado com alguns conceitos encontrados nos livros de ensino médio. Cinco dos sete livros analisados afirmam que a energia do ATP encontra-se na ligação fosfato e um afirma que a energia é armazenada quando o fosfato é incorporado no ATP. Além disso, seis livros apresentam ilustrações sugerindo a quebra do ATP como responsável pela liberação de energia.

Reforçando o que foi apresentado acima, em todos os livros analisados (graduação e ensino médio) encontra-se a representação (~) para ligação fosfato de alta energia, o que pode também contribuir para a manutenção deste conceito alternativo. Vale ressaltar que os livros de bioquímica alertam para a distorção conceitual que essa representação pode promover.

A maior parte dos alunos interrogados apresentam distorções conceituais quando ao papel da hidrólise do ATP. Eles consideram que o ATP fornece energia para os processos celulares por meio da hidrólise. Na maior parte dos livros de graduação de bioquímica o papel da hidrólise do ATP foi estabelecido como um critério para comparar a facilidade de transferência do grupo fosfato. Enquanto que nos livros de graduação de outras disciplinas isso não acontece. Já em dois livros do ensino médio foi encontrado que a hidrólise do ATP é a responsável por fornecer energia para os processos celulares.

Nos livros de graduação o conceito de acoplamento de reação está associado à hidrólise do ATP. A forma com que isso aparece associada com o conceito errôneo em que a quebra do ATP libera energia, presente nos alunos até mesmo antes de ingressarem em um curso superior, pode reforçar a ideia entre os alunos de graduação e pós-graduação de que a hidrólise do ATP libera energia. Talvez isso aconteça porque o aluno, ao entrar em contato com o conceito de acoplamento de reação, o interprete com seus conceitos alternativos implícitos.

O conceito de energia é extremamente abstrato e difícil de imaginar. Contudo, aceitamos a realidade da sua existência, mesmo que não possamos vê-la de maneira alguma. Mesmo assim, para alguns alunos o conceito de energia é substancializado, ou seja, ele é compreendido como um fluído material (Pozo, 2009). Algumas ilustrações, maioria dos livros de ensino médio, reforçam essa ideia, representando energia por balões.

Conceitos alternativos relacionados à termodinâmica do ATP são instrucionais, ou seja, são adquiridos na escola, tendo como possíveis origens o professor e o livro didático. Porém, meios de comunicação podem ajudar na manutenção desses conceitos. Na Scientific American Brasil (Janeiro 2010), revista de divulgação científica, foi encontrada uma ilustração que reforça os conceitos alternativos encontrados nos alunos.

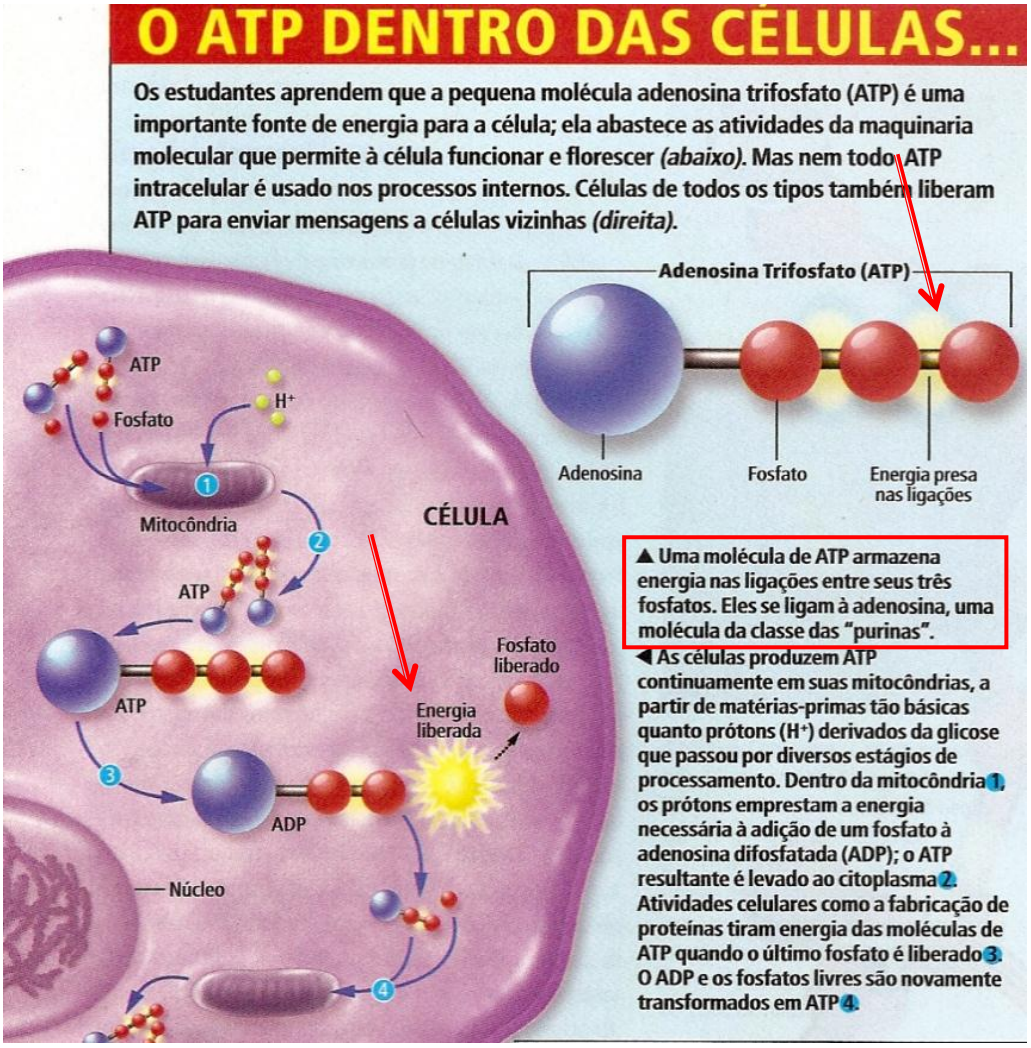


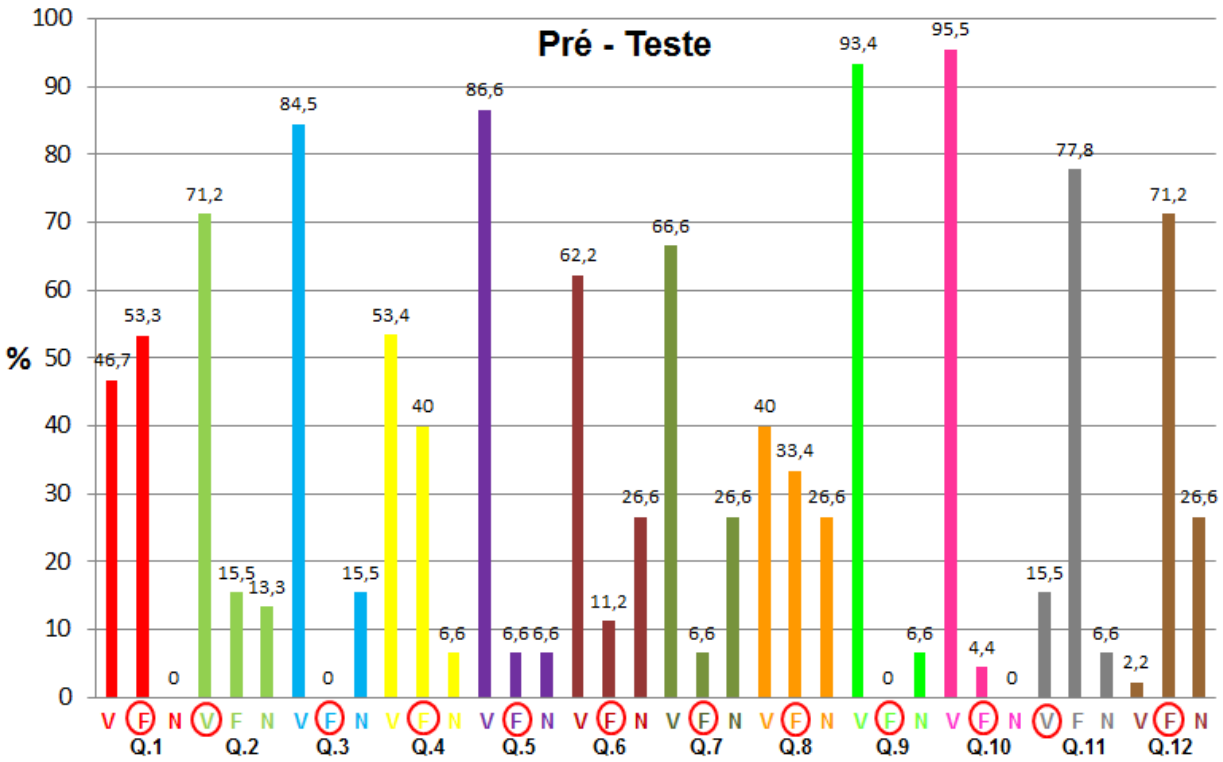
Figura 14 – Ilustração encontrada na revista Scientific American de Janeiro de 2010. As setas e o retângulo vermelho destacam alguns conceitos ou representações que podem promover a manutenção de conceitos alternativos.

4.3. Intervenção didática

Conforme foi descrito nos Procedimentos, para verificar o papel da intervenção didática, os alunos do primeiro ano de Farmácia-Bioquímica responderam dois questionários. Um antes da atividade interventora (pré – teste) e outro aproximadamente três meses depois (pós – teste).

O pré – teste, cujas questões encontram–se no Apêndice 2, tinha o intuito de averiguar a existência de conceitos prévios e, com isso, ter um parâmetro inicial de seus conhecimentos a respeito do papel termodinâmico do ATP.

O resultado do pré – teste encontra-se na figura 15



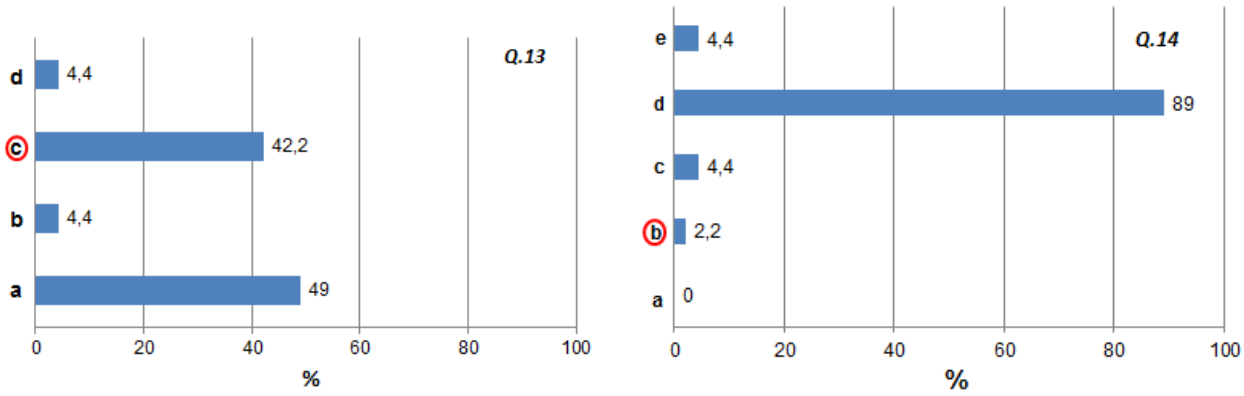


Figura 15 - Respostas do pré-teste dos alunos de Farmácia e Bioquímica. As respostas circuladas em vermelho são as corretas.

Os resultados do pré–teste são parecidos com os encontrados entre os alunos do ensino médio, graduação (medicina) e pós-graduação. Suspeitava-se disso, pois os alunos não tiveram nenhuma instrução específica sobre a termodinâmica do ATP e, além disso, eram alunos do primeiro ano de graduação.

Esses resultados mostram que 46,7% dos alunos apresentam a concepção de que a quebra de uma ligação química libera energia (questão 1). Quando a pergunta envolve a quebra da ligação fosfato na molécula de ATP (questão 4), a porcentagem aumenta para 53,4%. O resultado encontrado na questão 13 está de acordo com as duas questões anteriormente citadas, 49% dos alunos tem a concepção de que a energia liberada na hidrólise do ATP é derivada da quebra de ligações.

A maioria dos alunos que responderam o questionário apresenta o conceito de que a hidrólise do ATP é responsável por promover processos celulares, resultado parecido com o encontrado anteriormente para os outros alunos.

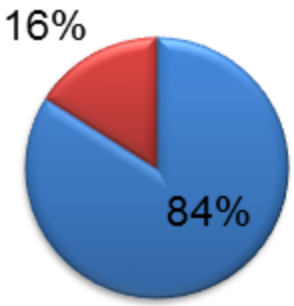


Figura 16 - Respostas do pós-teste dos alunos de Farmácia e Bioquímica. 84% dos alunos responderam e justificaram corretamente as questões.

Em aproximadamente três meses após a instrução, os alunos responderam um pós-teste (**Apêndice 3**). Escolheu-se passar o questionário um período após a instrução para verificar se o que foi discutido durante o processo instrucional foi de alguma forma incorporado. O resultado do questionário encontra-se na Figura 16. 84% dos alunos que responderam as questões consideraram falsas as três afirmações e justificaram de maneira correta. Os alunos que consideraram as afirmações falsas (resposta correta) tinham que justificar as respostas. Algumas dessas justificativas foram transcritas abaixo:

> *"A hidrólise do ATP não resulta em energia disponível para as células, mas sim em energia térmica."*

> *"O ATP participa da reação e não fornece apenas a energia necessária, como mostram as reações." (Justificativa referente à afirmação três)*

As justificativas escolhidas representam um padrão de resposta encontrado.

Foi computada como resposta incorreta aquela que continha pelo menos uma afirmação considerada verdadeira, justificativa incorreta das afirmações ou sem justificativa. Esses alunos correspondem a 16% do total que responderam o questionário.

A intervenção didática foi pontual, abordando o papel termodinâmico do ATP nas reações químicas. O intuito foi promover uma mudança conceitual mostrando que o ATP participa como reagente em uma reação química, favorecendo a formação de produtos que na sua ausência não se formariam e com isso minimizar a crença de que esses produtos são formados quando associados à hidrólise do ATP.

A estratégia adotada para promover uma mudança conceitual foi apresentada no item Procedimentos. Como resultado, no momento em que os alunos discutiram as questões do pré-teste, notaram uma inconsistência entre os seus conceitos e o texto. Isso promoveu uma discussão sobre o assunto e estimulou a curiosidade para saber o que eles consideravam como a “resposta correta”.

Os resultados da intervenção foram preliminares, mas mostram que boa parte dos alunos apresentou alguma mudança, podendo ser de linguagem ou mesmo conceitual. Sendo assim, são necessários mais dados para verificar ~~a~~ com mais detalhes a profundidade dessas mudanças.

A intervenção indicou ser possível promover uma mudança conceitual nos alunos referente à participação do ATP nas reações químicas, desde que se aborde o problema diretamente e de forma apropriada. Além disso, conhecer a existência do problema conceitual serviu para orientar a mudança proposta.

A falta de conhecimento por parte dos professores da existência de conceitos alternativos auxilia na sua manutenção. Tomar conhecimento de sua existência e propor atividades com o intuito de corrigir, ou pelo menos

minimizar conceitos alternativos, foram sugeridos em alguns trabalhos (Alwan, 2011; Cliff, 2006)

5. CONCLUSÃO

Os alunos que participaram da pesquisa apresentam conceitos alternativos referentes ao papel termodinâmico do ATP, mais especificamente no que se refere à forma com que o ATP participa dos processos celulares.

Os principais conceitos alternativos encontrados foram:

- A quebra da ligação fosfato do ATP libera energia.
- A hidrólise do ATP é responsável por fornecer energia para os diversos processos celulares.

Pode ser verificado que esses conceitos prevalecem entre os alunos independentes do seu nível de formação, resultado coerente com o que foi encontrado na literatura (Viennot, 1979).

Também foi verificado que esses conceitos alternativos encontram alguma relação com os conteúdos encontrados nos livros didáticos, cuja origem está na transposição didática mal planejada.

Foi verificado, de maneira preliminar, que a interferência didática pode auxiliar na correção desses conceitos alternativos.

6. REFERÊNCIAS

Aledo J. C. (2007) - Coupled reactions versus connected reactions - Biochemistry and Molecular Biology Education. vol. 35, nº 2, pp. 85–88.

Alves Filho, J. P. (2000), Tese de doutorado – Atividades Experimentais: do método à prática construtivista. Universidade Federal de Santa Catarina.

Alwan A. A. (2011) - Misconception of heat and temperature among physics students. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 12, 600–614.

Ben-Zvi R., Eylon B. and Silberstein J. (1986) – Is an atom of copper malleable? Journal of Chemical Education, vol. 63, p 64

Burnstock, G. (2006) – Historical Review: ATP as a neurotransmitter. TRENDS in Pharmacological Sciences 27 (3): 166-76.

Cheung, D. (2009) – Using think-aloud protocols to investigate secondary school chemistry teachers´ misconceptions about chemical equilibrium. Chemistry Education Research and Practice 10: 97-108.

Chevallard, Y. (1991) - La transposition didatique – du savoir savant au savoir enseigné. La Pensée Sauvage Edition. Grenoble

Coelho R. L. (2009) - On the concept of energy: History and philosophy for science teaching. Procedia Social and Behavioral Sciences 1, 2648–2652.

de Meis, L (1993) – The concept of energy-rich phosphate compounds: water, transport ATPases and entropic energy. Archives of Biochemistry and Biophysics 306(2):287-96.

Fleer, M. (1999) – Children´s alternative views: Alternative to what? International Journal of Science education, 21 (2):119-135.

Franzolin, F. (2007) – Conceitos de Biologia na educação básica e na academia: aproximações e distanciamento. Dissertação de Mestrado. FEUSP.

Galley, W.C. (2004) – Exothermic Bond Breaking: A Persistent Misconception. Journal of Chemical Education 81(4): 523-525.

George, P., Witonsky, R. T., Trachtman, M., Wu, C., Dorwart, W., Richman, L., Richman, W., Shurayh, F. and Lentz, B. (1970) - "Squiggle-H_2O". An enquiry into the importance of solvation effects in phosphate ester and anhydride reactions. Biochimica et Biophysica Acta 223 (1), 1-15.

Gordon, J. L. (1986) – Extracellular ATP: effects, source and fate. Biochem. J. 233(2):309-19.

Griffiths, A. K. and Preston K. R. (1992) – Grade–12 students´ misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. Journal of Research in Science Teaching 29(6): 611-628.

Johnstone, A. H., Macdonald, J. J. and Webb, G. (1977) – Misconceptions in school thermodynamics. Physics Education May: 248-251.

Langhi R. e Nardi R. (2007) - Ensino de astronomia: erros conceituais mais comuns presentes em livros didáticos de ciências. Cadernos Brasileiros de Ensino de Física., v. 24, n. 1: 87-111.

Lipmann F.- Metabolic generation and utilization of phosphate bond energy – Advances in Enzymology 1 (1941): 99–162.

Lopes A. R. C. (1996) - Potencial de Redução e Eletronegatividade: obstáculo verbal - Química Nova na Escola, 4: 21-23.

King C. J. H. (2010) - An Analysis of Misconceptions in Science Textbooks: Earth science in England and Wales. International Journal of Science Education, 32(5), 565-601.

Machado V. G. e Nome F. (1999) - Compostos fosfatados ricos em energia. Química Nova, 22(3):351-357.

Marandino, M. (2004) - Transposição ou recontextualização? Sobre a produção de saberes na educação em museus de ciências. Revista Brasileira de Educação, 26: 95-183.

Moreira, M.A.; Masini, E.A.F.S. (1982) – Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Morais.

Mortimer E. F. (1996) - Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? Investigações em Ensino de Ciências – V1(1), pp.20-39.

Morton, J. P. Dominic A. Doran; MacLaren, D. P.M. (2008) - Common student misconceptions in exercise physiology and biochemistry. Advances in. Physiology Education. 32: 142-146.

Nakhleh, M. B. (1992) – Why Some Students Don’t Learn Chemistry. Journal of Chemical Education 69(3):191-196.

Tekin B. B., Nakiboglu C. (2006) – Identifying Students´ Misconceptions about Nuclear Chemistry. A Study of Turkish High School Students. Journal of Chemical Education 88(11): 1712-1718.

Özmen H. (2004) – Some Student Misconception in Chemistry: A Literature Review of Chemical Bonding. Journal of Science Education and Technology 13(2):147-159.

Öztas F. (2009) – Basics laws of thermodynamics and the influence of vitalistic conception on learning of the high school students about matter cycle and energy flow. Journal of Applied Sciences 9 (5): 944 – 949.

Palmer, D. (1999) – Exploring ~~to~~ the link between students' scientific and nonscientific conceptions. Science Education 83: 639–653.

Posner G. J., Strike K. A., Hewson P. W., and Gertzog W. A. (1982) – Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. Science Education 66(2): 211–227.

Pozo J. I.; Crespo G. A. M. (2009) – A aprendizagem e o ensino de ciências: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico. 5ª ed. Artmed.

Spencer J. N. (1992) - Competitive and Coupled Reactions. Journal of Chemical Education, 69(4):281-284.

Sanger, M.J.; Greenbowe, T.J. (1997) – Student´s Misconceptions in Electrochemistry: Current Flow in Electrolyte Solutions and the Salt Bridge - Journal of Chemical Education 74(7):819-823.

Shulman, L. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. Harvard Educational Review, Vol. 57(1), pp. 1-22.

Viennot, L. (1979). Spontaneous Reasoning in elementary dynamics. European Journal of Science Education 1(2): 205-221.

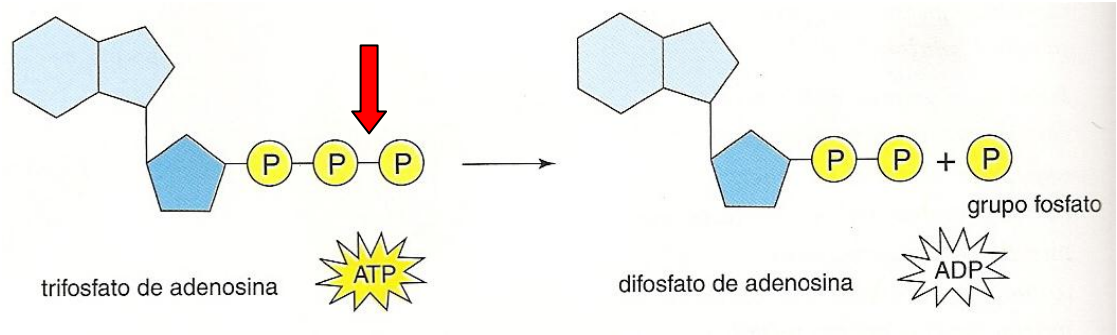
Apêndice 1

Assinale verdadeiro (V), falso (F) ou não sei (N) para as afirmações abaixo:

1. A quebra de uma ligação química libera energia. ( )

2. Reações que não ocorrem espontaneamente podem ocorrer com a participação do ATP. ( )

3 .



A energia liberada pelo ATP resulta da quebra da ligação (P) fosfato, indicada pela seta. ( )

4. A energia liberada pela conversão de ATP em ADP + P é utilizada para promover outras reações celulares. ( )

5. A obtenção celular de ATP é resultado da degradação da glicose ou do lipídio. ( )

6. Aminoácidos podem ser usados na obtenção de ATP. ( )

7. Uma vez que a maior parte do ATP celular é sintetizado na mitocôndria, pode-se afirmar que esta é uma organela que produz energia. ( )

8. As reações não espontâneas convertem-se em reações espontâneas quando associadas à hidrólise do ATP. ( )

9. A função celular do ATP é fornecer energia, derivada da sua hidrólise. ( )

10. Os processos celulares que requerem energia (síntese de polímeros, transferência de íons e moléculas contra gradiente, etc.) utilizam a energia derivada da hidrólise do ATP. ( )

11. A hidrólise do ATP libera energia como calor, que não pode ser utilizado pelas células. ( )

12. Os processos celulares que requerem energia utilizam a energia térmica proveniente da hidrólise do ATP. ( )

13. Reações não espontâneas em determinadas situações são espontâneas em outras situações. ( )

14.

Glicose + fosfato(P) → glicose-6-fosfato $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ (1)

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P$ $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ (2)

A formação de glicose fosfato pode ser obtida se for associada à hidrólise do ATP ( )

15. Assinale a resposta correta.

A energia liberada na reação de hidrólise do ATP

a. é derivada da quebra de ligações
b. é consequência da formação de ligações novas
c. é o saldo das energias liberadas e consumidas nas quebras e formações de ligações dos componentes da reação.
d. é a soma das energias liberadas nas quebras e formações de ligações.

16. Assinale a resposta correta.

$A + B \rightarrow A\text{-}B$ $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ (1)

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi$ $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ (2)

$A + B + ATP + H_2O \rightarrow A\text{-}B + ADP + Pi$ (3)

Com relação às reações acima se pode afirmar que apenas

a. a reação (1) ocorre.

b. a reação (2) ocorre.

c. a reação (3) ocorre

d. as reações (2) e (3) ocorrem.

e. as reações (1) e a (2) ocorrem.

Apêndice 2

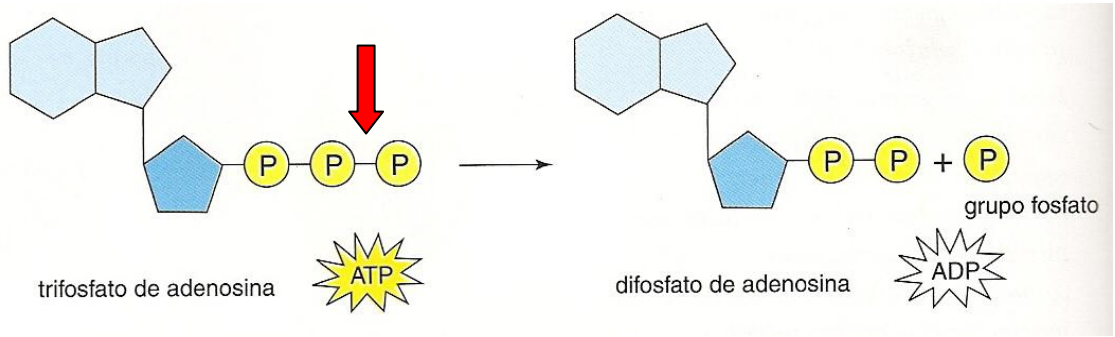
Assinale verdadeiro (V), falso (F) ou não sei (N) para as afirmações abaixo:

1. A quebra de uma ligação química libera energia. ( )

2. Reações não espontâneas em determinadas situações são espontâneas em outras situações. ( )

3. Reações que não ocorrem espontaneamente podem ocorrer com a participação do ATP. ( )

4 .



A energia liberada pelo ATP resulta da quebra da ligação (P) fosfato, indicada pela seta. ( )

5. A energia liberada pela conversão de ATP em ADP + P é utilizada para promover outras reações celulares. ( )

6. Uma vez que a maior parte do ATP celular é sintetizada na mitocôndria, pode-se afirmar que esta é uma organela que produz energia. ( )

7. Glicose + fosfato(P) → glicose-6-fosfato $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ (1)

ATP + H_2O → ADP + P $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ (2)

A formação de glicose fosfato pode ser obtida se for associada à hidrólise do ATP ( )

8. As reações não espontâneas convertem-se em reações espontâneas quando associadas à hidrólise do ATP ( )

9. A função celular do ATP é fornecer energia, derivada da sua hidrólise. ( )

10. Os processos celulares que requerem energia (síntese de polímeros, transferência de íons e moléculas contra gradiente, etc.) utilizam a energia derivada da hidrólise do ATP. ( )

11. A hidrólise do ATP libera energia como calor, que não pode ser utilizado pelas células. ( )

12. Os processos celulares que requerem energia utilizam a energia térmica proveniente da hidrólise do ATP. ( )

13. Assinale a resposta correta.

A energia liberada na reação de hidrólise do ATP

a. é derivada da quebra de ligações
b. é consequência da formação de ligações novas
c. é o saldo das energias liberadas e consumidas nas quebras e formações de ligações dos componentes da reação.
d. é a soma das energias liberadas nas quebras e formações de ligações.

14. Assinale a resposta correta.

$A + B \rightarrow A\text{-}B$ $\Delta G^{0'} = +15\ kJ.mol^{-1}$ (1)

$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi$ $\Delta G^{0'} = -31\ kJ.mol^{-1}$ (2)

$A + B + ATP + H_2O \rightarrow A\text{-}B + ADP + Pi$ (3)

Com relação às reações acima se pode afirmar que apenas

a. a reação (1) ocorre.
b. a reação (2) ocorre.
c. a reação (3) ocorre
d. as reações (2) e (3) ocorrem.
e. as reações (1) e a (2) ocorrem.

Apêndice 3

Assinale V ou F para as seguintes afirmações. Se a frase for F, explique porque.

1. Entre os processos celulares mais dispendiosos do ponto de vista energético está a síntese de proteínas. A energia requerida para está síntese é obtida pela hidrólise de grandes quantidades de ATP. ( )

2. O colesterol é uma molécula formada por 27 átomos de carbono, todos provenientes de acetil-CoA. É possível prever que a síntese de colesterol está associada à seguinte reação:

   $ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i$ ( )

3. A formação de glicose 6 – fosfato a partir de glicose e ATP exemplifica o processo de doação de energia pelo ATP, como mostram as seguintes reações parciais e sua soma:

   $ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i + \text{energia}$

   $\underline{\text{glicose} + P_i + \text{energia} \rightarrow \text{glicose 6 – fosfato} + H_2O}$

   $ATP + \text{glicose} \rightarrow \text{glicose 6 – fosfato} + ADP$ ( )