

## De um Simples Modelo à Complexidade de um Sistema Dinâmico: a transformação dos estados físicos e a tempestade

*From a Simple Model to the Complexity of a Dynamic System: the transformation of physical states and the storm*

*De un Modelo Simple a la complejidad de un Sistema Dinámico: la transformación de estados físicos y la tormenta*

**Paulo Vitor Teodoro** ([paulovitor-teodoro@ufu.br](mailto:paulovitor-teodoro@ufu.br))  
Universidade Federal de Uberlândia  
<https://orcid.org/0000-0003-0939-984X>

**Paulo Salles** ([pssalles@gmail.com](mailto:pssalles@gmail.com))  
Universidade de Brasília  
Ministério de Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços  
<https://orcid.org/0000-0003-3089-399X>

**Ricardo Gauche** ([ricardogauche@gmail.com](mailto:ricardogauche@gmail.com))  
Universidade de Brasília  
<https://orcid.org/0000-0001-9310-0489>

### Resumo

Este estudo apresenta os resultados de quatro simulações baseadas em técnicas de Inteligência Artificial (IA), que ilustram as trocas de energia durante as transições dos estados físicos da água. Foram desenvolvidos modelos qualitativos computacionais fundamentados no Raciocínio Qualitativo (RQ), uma área da IA que permite representar funções matemáticas sem o uso de números e com relações de causalidade explicitamente identificadas. Estudos anteriores demonstraram o potencial do RQ para abordar sistemas dinâmicos, facilitando a análise de conceitos complexos por meio de atividades que exploram o raciocínio hipotético-dedutivo, ampliando, assim, o leque de materiais e atividades disponíveis para professores e estudantes. Nesta pesquisa, utilizamos a plataforma de modelagem *DynaLearn* ([www.dynalearn.eu](http://www.dynalearn.eu)) para construir os modelos e executar as simulações. O *DynaLearn* é um *software* com interface gráfica e seis níveis de aprendizagem, denominados *Learning Spaces* (LS), gradativamente mais complexos, que facilitam a construção de modelos e a apresentação dos resultados de simulações. O



Este texto é licenciado pela Creative Commons Attribution 4.0 International License.

primeiro resultado caracteriza-se pela elaboração de um modelo relativamente simples, mas que representa a transição dos estados físicos da água conforme a variação de temperatura. Embora sem uma explicação causal detalhada, o modelo identifica pontos e intervalos que demonstram que uma substância não altera seu estado físico sem antes iniciar e finalizar a mudança de cada estado. Em seguida, expandimos o cenário, incluindo diferentes relações de causalidade e representando processos naturais, como evaporação, condensação e precipitação. Posteriormente, aplicamos os modelos a um fenômeno natural recorrente no Brasil: as tempestades. Os modelos apresentados são potentes ferramentas para o ensino de Ciências e Química, destacando a principal explicação para a transição dos estados físicos, que dificilmente é abordada em sala de aula: a troca de energia. Por fim, discutimos as potencialidades e limitações do simulador utilizado, elucidando que, embora o *DynaLearn* seja uma ferramenta potente para representar sistemas naturais, existem condições mínimas para que isso aconteça no contexto da educação básica, como a disponibilidade de computadores em pleno funcionamento e com acesso à internet.

**Palavras-chave:** Inteligência Artificial. Modelagem. Ensino de Ciências.

### **Abstract**

This study presents the results of four simulations based on Artificial Intelligence (AI) techniques that illustrate the energy exchanges during the transitions of the physical states of water. Computational qualitative models were developed based on Qualitative Reasoning (QR), an area of AI that allows the representation of mathematical functions without the use of numbers and with explicitly identified causal relationships. Previous studies have demonstrated the potential of QR to address dynamic systems, facilitating the analysis of complex concepts through activities that explore hypothetical-deductive reasoning, thus expanding the range of materials and activities available to teachers and students. In this research, we used the DynaLearn modeling platform ([www.dynalearn.eu](http://www.dynalearn.eu)) to build the models and run the simulations. DynaLearn is a graphical interface software with six learning levels, called Learning Spaces (LS), which gradually increase in complexity, facilitating the construction of models and the presentation of simulation results. The first result is characterized by the development of a relatively simple model that represents the transition of water's physical states as temperature varies. Although without a detailed causal explanation, the model identifies points and intervals that show a substance does not change its physical state without first starting and completing the transition of each state. Then, we expanded the scenario by including different causal relationships and representing natural processes such as evaporation, condensation, and precipitation. Subsequently, we applied the models to a recurring natural phenomenon in Brazil: storms. The models presented are powerful tools for the teaching of Science and Chemistry, highlighting the main explanation for the transition of physical states, which is rarely addressed in the classroom: energy

exchanges. Finally, we discuss the potentialities and limitations of the simulator used, explaining that although DynaLearn is a powerful tool for representing natural systems, there are minimum conditions necessary for its use in basic education, such as fully functioning computers and internet access.

**Keywords:** Artificial Intelligence. Modeling. Teaching-Learning. Science Education.

## Resumen

Este estudio presenta los resultados de cuatro simulaciones basadas en técnicas de Inteligencia Artificial (IA), que ilustran los intercambios de energía durante las transiciones de los estados físicos del agua. Se desarrollaron modelos cualitativos computacionales fundamentados en el Razonamiento Cualitativo (RC), un área de la IA que permite representar funciones matemáticas sin el uso de números y con relaciones de causalidad explícitamente identificadas. Estudios anteriores han demostrado el potencial del RC para abordar sistemas dinámicos, facilitando el análisis de conceptos complejos a través de actividades que exploran el razonamiento hipotético-deductivo, ampliando así el abanico de materiales y actividades disponibles para profesores y estudiantes. En esta investigación, utilizamos la plataforma de modelado DynaLearn ([www.dynalearn.eu](http://www.dynalearn.eu)) para construir los modelos y ejecutar las simulaciones. DynaLearn es un software con interfaz gráfica y seis niveles de aprendizaje, denominados Learning Spaces (LS), que aumentan gradualmente en complejidad, facilitando la construcción de modelos y la presentación de los resultados de las simulaciones. El primer resultado se caracteriza por la elaboración de un modelo relativamente simple que representa la transición de los estados físicos del agua conforme varía la temperatura. Aunque sin una explicación causal detallada, el modelo identifica puntos e intervalos que muestran que una sustancia no cambia su estado físico sin antes iniciar y finalizar la transición de cada estado. Luego, ampliamos el escenario incluyendo diferentes relaciones de causalidad y representando procesos naturales como la evaporación, la condensación y la precipitación. Posteriormente, aplicamos los modelos a un fenómeno natural recurrente en Brasil: las tormentas. Los modelos presentados son herramientas potentes para la enseñanza de Ciencias y Química, destacando la explicación principal para la transición de los estados físicos, que raramente se aborda en el aula: los intercambios de energía. Finalmente, discutimos las potencialidades y limitaciones del simulador utilizado, explicando que, aunque DynaLearn es una herramienta potente para representar sistemas naturales, existen condiciones mínimas necesarias para su aplicación en la educación básica, como computadoras en pleno funcionamiento y acceso a internet.

**Palabras clave:** Inteligencia Artificial. Modelado. Enseñanza-Aprendizaje. Enseñanza de Ciencias.

## **Introdução**

O que acontecerá em relação ao estado físico da água se a temperatura for aumentada? O que acontecerá com o estado físico da água se diminuirmos a temperatura? Essas são duas provocações que qualquer estudante do Ensino Médio, no contexto brasileiro, deveria ser capaz de refletir e responder a essas questões, posto que o estado físico da matéria é explorado no Ensino Fundamental, geralmente no 9.<sup>o</sup> ano, e aprofundado na 1.<sup>a</sup> série do Ensino Médio, na disciplina de Química. Ademais, o referido conteúdo é amplamente utilizado para a compreensão de conceitos sobre as propriedades dos materiais, que é base fundamental no ensino da Química.

Muitas vezes, os professores procuram relacionar o conhecimento de transformação dos estados físicos da água com fenômenos do dia a dia, pois são diversas situações cotidianas e esporádicas que tangenciam a mudança dos estados da matéria, por exemplo, a solidificação da água para deixar alguma bebida mais fresca, a formação da chuva, a roupa secando no varal, a ebulição da água para preparar o café, dentre vários outros.

Os estados físicos da matéria são uma frente importante para o desenvolvimento do raciocínio químico entre os estudantes da educação básica. A Química é uma área das Ciências Naturais que se dedica a compreender a transformação da matéria. No entanto, os estudantes (e por vezes professores) dificilmente conseguem fornecer uma explicação causal dos mecanismos que atuam no comportamento de transformação do estado físico da matéria.

O elo entre comunicação do professor e do estudante sobre as explicações e previsões de como se comporta a transformação do estado da matéria, por vezes, não favorece o processo de ensino-aprendizagem no ensino de Ciências/Química (Teodoro; Salles; Gauche, 2023). Isso acontece por várias razões, como: os materiais didáticos são estanques, não permitindo que os professores e estudantes construam os seus próprios materiais (Souza; Gauche; Salles, 2017); o ensino da Ciência/Química dificilmente viabiliza uma compreensão dos processos envolvidos na transformação dos estados físicos como um sistema dinâmico (Souza, 2019); a abordagem do professor em sala de aula para explicações de fenômenos é predominantemente representacional e teórica, desarticulado da dimensão macroscópica (Leal, 2010).

Em relação à compreensão dos fenômenos envolvidos na mudança de transformação da matéria, o laboratório de ciências pode ser uma opção para visualizar as evidências, que podem ser observadas, como, por exemplo, a mudança de estado físico, alteração de cor e temperatura. No entanto, o laboratório não é uma opção para que os estudantes possam compreender a dinamicidade do sistema, a partir de representações, explicações e previsões de resultados que envolvem a teoria da mudança do estado físico da matéria: as trocas de energia, que, segundo Tiedeman (1998), é a principal explicação para a transição dos estados físicos da matéria. Nesse sentido, a questão de problema que guiou este estudo é: *Como representar as trocas de energia em um modelo computacional, usando técnicas de Inteligência Artificial (IA), para a explicação da transição dos estados físicos da matéria?*

Os modelos computacionais de simulações são alternativas com potencial para auxiliar os estudantes no processo de construção de modelos explicativos. A título de esclarecimento, podemos citar o trabalho de Ribeiro e Greca (2003), que realizaram um estudo de revisão em artigos publicados em revistas internacionais na área de educação química, no período entre 1992 e 2002. Os autores já demonstravam que, até 2002, o uso de modelos de simulações estava aumentando, no contexto da sala de aula. Teodoro, Gomes e Silva (2023) também realizaram um estudo de revisão no período compreendido entre 2000 e 2022, verificando que os modelos de simulação têm sido usados com potencial em diferentes áreas das Ciências Naturais, como na Educação Bilíngue para estudantes surdos e no ensino de ciências do Ensino Fundamental, Biologia, Química e Física.

De fato, o Raciocínio Qualitativo (RQ) tem grande potencial para o desenvolvimento de modelos conceituais que podem ser usados na educação científica em Química (para um exemplo no ensino de Química/Ciências, ver Souza, Salles e Gauche, 2017). Utilizando a ontologia fornecida pela Teoria dos Processos Qualitativos (TPQ) (Forbus, 1984), modelos computacionais e simulações podem ser construídos para a representação dinâmica de fenômenos naturais.

Dessa forma, este texto tem como objetivo apresentar os resultados de quatro simulações, baseadas em técnicas da IA, que evidenciam as trocas de energia envolvidas na transição dos estados físicos da água. Para isso, foram elaborados modelos qualitativos de simulação que mostram: a transição dos estados físicos da água com o aumento e a

diminuição da temperatura; os processos de evaporação, condensação e precipitação na transição de estados físicos, envolvendo as trocas de energia; e, ainda, um exemplo de aplicação dos modelos a partir de um efeito muito comum em áreas urbanas: a tempestade.

A escolha pelo tema, aqui apresentado, sobre as transformações da matéria se justifica por tratar de um assunto atual, complexo, geralmente presente nas aulas de Ciências do 9.º ano do ensino fundamental e também na 1.ª série do Ensino Médio, na disciplina de Química. Além disso, a compreensão da transformação da matéria é o cerne das aulas de Química da escola de Educação Básica.

A seção 2 descreve os principais elementos da TQP. A seção 3 descreve o desenho e a metodologia para a implementação dos modelos qualitativos. A seção 4 descreve as simulações e os resultados obtidos. Finalmente, na seção 5, apresentamos os comentários sobre o trabalho e o potencial da modelagem qualitativa para a educação em química.

### ***Teoria Qualitativa dos Processos***

A abordagem escolhida para este texto é fundamentada na TQP (Forbus, 1984). Nessa teoria, ações que causam mudanças nos objetos durante um determinado tempo, são intuitivamente caracterizadas como processos. Assim, para entender o raciocínio físico e criar modelos que representem essa interação com o mundo físico, é importante mencionar o que são e como atuam os processos, base da TQP. Cabe destacar que, para implementar os modelos, utilizamos a bancada de modelagem *DynaLearn* (Bredeweg et al., 2013). Nesta, os modelos podem ser de diferentes níveis de complexidade, chamados Learning Spaces: LS1, LS2, LS3, LS4, na versão da plataforma disponível na internet. O *DynaLearn* pode ser acessado em <https://www.dynalearn.nl/>.

Em um modelo, os objetos do sistema são representados por 'Entidades'. As variáveis dos objetos, suas propriedades, são representadas como 'Quantidades'. Os valores qualitativos das quantidades são dados pelas duas variáveis <magnitude, derivada>. A magnitude representa a quantidade de uma variável (por exemplo, o tamanho da 'coisa': {'pequeno', 'médio', 'grande'}; por outro lado, a derivada representa a direção da mudança do valor dessa variável, com valores {'Positivo', 'Zero', 'Negativo'}, os quais indicam que a variável está crescendo, estável ou decrescendo, respectivamente (Forbus, 1984).

A causalidade é representada pelas influências diretas (I+ ou I-) e pelas proporcionalidades qualitativas (P+ ou P-). Na TQP, as influências diretas representam processos, a principal causa da mudança em um sistema. Os efeitos dessas mudanças influenciam outras partes do sistema, que são transmitidas por meio de P+ ou P-. Por exemplo, uma influência direta (I+ ou I-), que modela os efeitos de um processo, na TQP é descrita como: I+ (A, B). Tanto na representação das influências diretas (I+ e I-) quanto das proporcionalidades qualitativas (P+ e P-), a primeira quantidade entre parênteses é influenciada pela segunda. A título de exemplificação, podemos mostrar a representação: I+ (A, B). Isso significa que B influencia A. De maneira similar, P+ (W, Z) significa que W é influenciada por Z.

Em relação à interpretação, a TQP mostra que numa representação do tipo I+ (A, B), o valor da magnitude de B é adicionada ao valor da magnitude de A e, portanto, essa quantidade começa a aumentar. As proporcionalidades qualitativas (P+ e P-), também possuem interpretação matemática. Elas representam funções monotônicas (estritamente crescente ou estritamente decrescente), de tal forma que, se a relação entre duas variáveis tiver uma proporcionalidade positiva (P+), a direção de mudança da quantidade influenciadora fará com que a quantidade influenciada mude na mesma direção. Simbolicamente, se a relação é P+ (W, Z) e Z estiver aumentando (derivada positiva), então W também terá derivada positiva (e aumentará) (Forbus, de Kleer, 1993).

### **Procedimentos Metodológicos**

A presente pesquisa é caracterizada como um estudo teórico (Gamboa, 2007), uma vez que se fundamenta na construção e análise de modelos conceituais voltados para explicar a transição de estados físicos. Nesse contexto, o estudo apresenta os resultados de quatro simulações, baseadas em técnicas da IA, que demonstram as trocas de energia envolvidas na transição dos estados físicos da água. O processo metodológico é baseado na elaboração de representações que visam proporcionar uma abordagem explicativa detalhada e alinhada com os princípios da modelagem científica como ferramenta para a compreensão de processos físicos complexos.

Os modelos qualitativos de simulação foram desenvolvidos em diferentes níveis de aprendizagem, chamados *Learning Spaces* (LS, em inglês), que se tornam gradualmente mais complexos. O *DynaLearn* oferece seis LS, cada um disponibilizando

progressivamente mais elementos para a construção de modelos e a realização de simulações com níveis crescentes de complexidade.

No LS1, temos o nível mais simples do *DynaLearn*, onde é possível apenas inserir conceitos hierarquizados, semelhantes a mapas conceituais. No LS2, já é possível realizar simulações com relações de causa e efeito. No LS3, introduzimos as ‘magnitudes’, que representam a ‘quantidade’ de uma variável, como o ‘tamanho de algo’ (por exemplo: ‘Pequeno’, ‘Grande’, ‘Quente’, ‘Gelado’). No LS4, passamos a representar processos, que são as principais causas de mudança no sistema. No LS5, é possível estabelecer condições para que determinados fenômenos ocorram ou deixem de ocorrer. Por exemplo, se uma substância tóxica afeta os peixes de um lago apenas a partir de certa concentração, o modelo precisaria descrever dois cenários: um abaixo do limite (os peixes não morrem) e outro acima do limite (os peixes começam a morrer). Finalmente, o LS6 é o nível mais complexo do *DynaLearn*. A principal diferença é que partes independentes do modelo, conhecidas como Fragmentos de Modelo (FMs), podem ser construídas e armazenadas na biblioteca da plataforma.

Na pesquisa aqui apresentada, nos apropriamos de uma situação-problema que envolve a precipitação da água, geralmente conhecida pelos estudantes: as tempestades e os efeitos no ambiente urbano. Primeiro, mostraremos um simples modelo, construído no espaço de aprendizagem LS3, para representar a dinâmica de um sistema de transição dos estados físicos da água, ainda que sem uma explicação causal, mas que mostra alguns importantes conhecimentos na disciplina de Química e Ciências: a existência da água em estados físicos diferentes (sólido, líquido e vapor), bem como os pontos de transição dos estados, por exemplo (início da fusão, fim da fusão, início da vaporização, fim do líquido). A representação de pontos e intervalos colabora para explicações de que uma substância não altera o seu estado físico, sem antes iniciar e findar a mudança de cada estado.

Em seguida, apresentamos um dos estados de transição mais importantes do ciclo da água, e que colabora com os efeitos de fenômenos naturais, como da tempestade: a evaporação. Mostraremos que a *Taxa de evaporação* é o que influencia a *Energia cinética do vapor*, gerando *Vapor de água* no ambiente. Além disso, a *Taxa de evaporação* afeta também a *Energia cinética do líquido*, e conseqüentemente a quantidade de *Água líquida*.

Depois, mostramos um modelo mais complexo, representando dois processos de mudanças de estados físicos (evaporação e condensação) e o processo da precipitação da



chuva. Nesse modelo, representamos o comportamento cíclico da água, entre a atmosfera e a terra. É um modelo que mostra a causalidade atuando em uma única direção, de forma que, em um determinado período, o vapor que está na atmosfera precipitará como chuva; e a água líquida, que está na terra, em outro período, vai evaporar, e voltará a ser precipitada.

Finalmente, ampliamos e aplicamos os modelos dos processos envolvidos na transformação de estados físicos da água, para representar as tempestades, que constantemente ocorrem no Brasil. A título de esclarecimento, podemos citar algumas das tragédias envolvendo o caso das tempestades, no Brasil: em 2019, no Rio de Janeiro; em 2020, 2021, e em 2023, no Rio Grande do Sul; em 2022, em Recife. Constantemente os casos de tempestades contemplam discussões no cenário brasileiro, e sensibiliza a população, especialmente pelas mortes e danos sociais e econômicos causados às cidades. Um exemplo dos danos sociais e econômicos pode ser visualizado no vídeo, transmitido em rede nacional [<https://globoplay.globo.com/v/7540228/programa/>].

O vídeo também mostra que, devido às mudanças climáticas, as tempestades estão mais frequentes e mais intensas, principalmente em épocas do ano em que as temperaturas são mais elevadas. Na presente situação, foram 20 dias sem chuva, com temperaturas próximas aos 40°C, no Rio de Janeiro. A atmosfera mais aquecida forma nuvens profundas, que provocam chuvas mais intensas. Com base nas informações do vídeo sobre a tempestade e em modelos sobre as transições entre estados da água, foi elaborado o modelo 'Tempestade'. Embora seja mais complexo, o modelo foi construído com base em um dos padrões de modelagem descritos por Salles et al. (2012).

O padrão escolhido envolve a representação de sistemas dinâmicos, em que as variáveis são interconectadas por meio de fluxos que determinam as taxas de mudança ao longo do tempo. Esse padrão facilita a criação de representações que tenham balanço de cargas, para calcular os valores das taxas. Em termos práticos, o padrão oferece uma estrutura modular que permite que diferentes componentes do sistema interajam, fornecendo uma visão qualitativa das relações entre as variáveis. Esse modelo pode ser encontrado no texto '*Qualitative Model Patterns: a Toolkit for Learning by Modelling*', de Salles et al. (2012).

Para todos os modelos aqui descritos, identificamos os elementos fundamentais da modelagem qualitativa: os objetos, representados pelas 'entidades'; as propriedades dos

objetos, as quais são descritas por ‘quantidades’; as ‘configurações’, que mostram a relação entre ‘entidades’; as relações de influência entre as ‘quantidades’; e, finalmente, os espaços quantitativos, que mostram os valores das propriedades. Depois, fizemos um teste de conceitos, utilizando o *software DynaLearn*.

Os modelos foram submetidos a um processo de validação conduzido por especialistas, incluindo professores e pesquisadores das áreas de Ciências Naturais de uma instituição pública federal no Brasil. A validação seguiu a metodologia proposta por Rykiel (1996), que envolve duas etapas principais: a avaliação conceitual e a avaliação operacional. Na avaliação conceitual, os especialistas analisaram a coerência teórica dos modelos, verificando se suas estruturas e princípios estavam de acordo com os conceitos científicos. Já na avaliação operacional, foi examinado se os modelos funcionavam corretamente em termos de simulação e previsão de resultados.

## **Resultados e discussão**

Nessa seção, apresentamos os resultados deste texto: quatro modelos, com as respectivas simulações, sobre a transição dos estados físicos da água, envolvendo as trocas de energia.

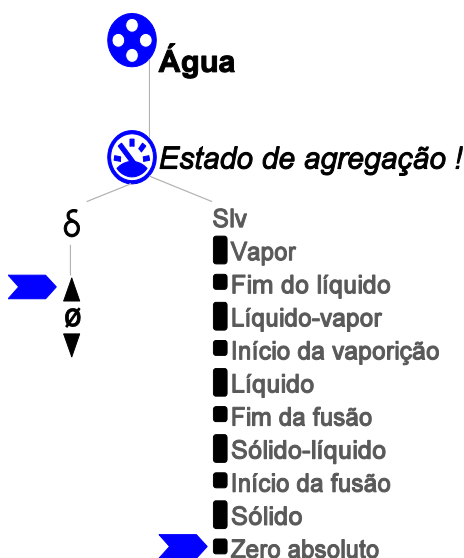
### ***Modelo da Transição dos estados físicos da água***

Com um modelo simples em *DynaLearn*, no terceiro nível de complexidade, LS3, é possível representar a dinâmica de um sistema de transição dos estados físicos da água, ainda que sem uma explicação causal. Na Figura 1 podemos perceber um Cenário, muito simples, porém que representa alguns importantes conhecimentos na disciplina de Química.

Segundo Leal (2010), a água, assim como outras substâncias e misturas, pode existir em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso, como mostrado nos intervalos dos Espaços Quantitativos (EQs) de magnitude {sólido, líquido, vapor}. Esses EQs mostram também uma importante representação referente aos pontos de transição dos estados físicos: início da fusão, fim da fusão, início da vaporização, fim do líquido. Geralmente, os materiais didáticos e de apoio ao professor, atualmente, não identificam os pontos e os intervalos referentes a transição dos estados físicos. Souza (2019) nos mostra que isso acontece porque, geralmente, os materiais didáticos disponíveis mostram sistemas estáticos, e dificilmente conseguem abranger as explicações que acontecem no sistema.

A representação de pontos e intervalos colabora para explicações de que uma substância não altera o seu estado físico, sem antes iniciar e findar a mudança de cada estado. A Figura 1 mostra o cenário do modelo 'Transição dos estados físicos da água com o aumento da temperatura'.

**Figura 1** - Cenário do modelo "Transição dos estados físicos da água com o aumento da temperatura".



Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

O modelo da Figura 1 acima, mostra a quantidade *Estado de agregação* com derivada positiva e o valor da magnitude em 'Zero absoluto', isto é, a menor temperatura possível a ser atingida. A simulação começa com um estado inicial e produz 10 estados. Faz-se necessário pontuar que cada estado pode ser definido como um conjunto específico de valores de todas as quantidades que caracterizam o objeto, representado no modelo. A Figura 2, abaixo apresenta o grafo de estados gerado, com a respectiva trajetória de comportamento:

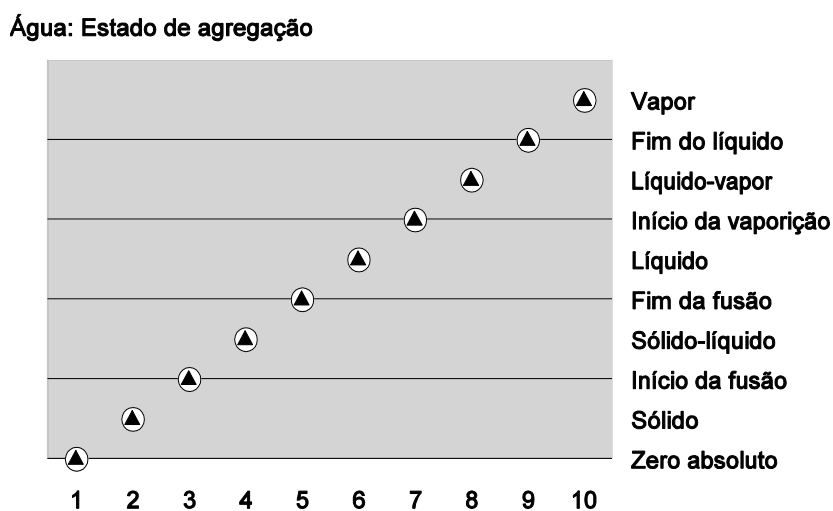
**Figura 2** - Grafo de estados do modelo "Transição dos estados físicos da água com o aumento da temperatura".



Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

Os valores assumidos pela quantidade representada no modelo, *Estado de Agregação*, durante a simulação são apresentados na Figura 3. Esse diagrama, chamado *Value History Diagram (VHD)*, mostra a história da variação dos valores das quantidades durante a 'história' descrita na simulação e permite compreender as mudanças ocorridas nas transições entre os estados: [1] → [2] → [3] → [4] → [4] → [5] → [6] → [7] → [8] → [9] → [10].

**Figura 3** - VHD obtido na simulação do modelo "Transição dos estados físicos da água com o aumento da temperatura".

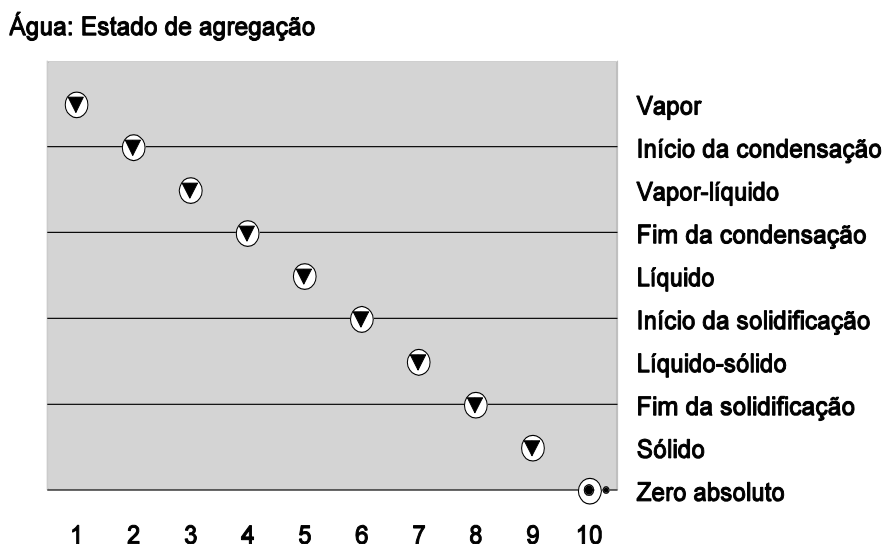


Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

No Cenário inicial desta simulação, consideramos que o valor da derivada da temperatura é 'Positivo' em toda a simulação. Assim, no estado 1, a substância tem o estado físico 'Zero absoluto' (um ponto): equivale à menor temperatura possível a ser atingida e equivale a  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $0\text{ K}$ . Como a temperatura está aumentando, a água passará para um intervalo em que a magnitude é 'sólido', no estado 2. Como a temperatura está aumentando, a substância chegará a um ponto/instante em que iniciará a fusão, no estado 3. A partir desse estado, a substância atingirá o intervalo 4, em que a substância estará tanto no estado sólido, quanto no estado líquido, até findar a fusão, no estado 5. Como esse modelo não tem mecanismo de controle, a temperatura continua aumentando, e a substância passa para o intervalo 'Líquido', até o ponto em que inicia a vaporização, no estado 7. Em seguida, no intervalo 8, tem-se a substância no estado líquido e vapor, terminando a quantidade líquida no estado 9. A partir daí, a substância se estabelece no estado vapor, e sua temperatura continua aumentando.

Assim como fizemos este sistema com a temperatura aumentando, podemos também estabelecer outro modelo, com resultados similares, que representa a mudança de estados físicos, porém, com a diminuição da temperatura (do vapor ao estado sólido no zero absoluto), como mostra o VHD da Figura 4.

**Figura 4** - VHD obtido na simulação do modelo “Transição dos estados físicos da água com a diminuição da temperatura”.

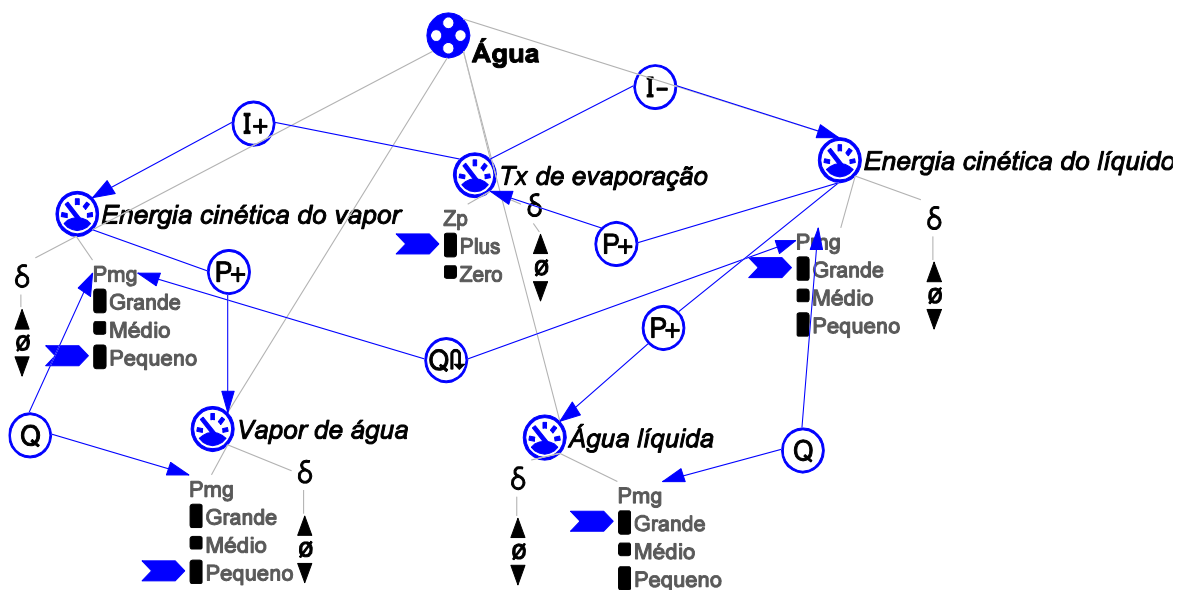


Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

### **Modelo da Evaporação com trocas de energia**

Este modelo é relativamente simples, mas rico de informações sobre um dos fenômenos (processos) mais importantes do ciclo da água: a evaporação. No cenário inicial elaborado (Figura 5), podemos mostrar que a *Taxa de evaporação* influencia a *Energia cinética do vapor*, que por sua vez afeta a quantidade *Vapor de água* no ambiente. Além disso, a *Taxa de evaporação* afeta também a *Energia cinética do líquido*, e conseqüentemente a quantidade de *Água líquida*. Cabe destacar que os modelos identificam aquilo que Tiedeman (1998) nos mostra sobre o principal fator que colabora na transição dos estados físicos da matéria: as trocas de energia.

**Figura 5** - Cenário do modelo “Evaporação com trocas de energia”.



Fonte: imagem gerada em DynaLearn.

No referido cenário (Figura 5), a *Energia cinética do vapor* tem a magnitude ‘Pequeno’ e a *Energia cinética da água líquida* tem a magnitude ‘Grande’. O processo está representado pela *Taxa de evaporação*, a qual influencia com I+ a *Energia cinética do vapor*, e I- a *Energia cinética do líquido*. Considerando que *Taxa de evaporação* tem magnitude ‘Plus’ (positiva), esse processo está ativo, provocando mudanças em todo sistema, uma vez que nele se inicia a cadeia de causalidade. Então, quando a *Taxa de evaporação* é positiva, e a influência direta é I+, a quantidade *Energia cinética do líquido* vai diminuir conectadas pela influência direta (I-). Dessa forma, quando a *Taxa de evaporação* é positiva, a quantidade *Energia cinética do líquido* diminuirá, até certo limite, uma vez que o sistema está sendo controlado por mecanismos de retroalimentação balanceadora (feedback negativo) (*Taxa de evaporação* ← *Energia cinética do líquido*), o que indica que o processo relacionado a essas quantidades são controlados e não continuam, ativos, indefinidamente.

E se *Energia cinética do líquido* diminuir, *Água líquida* também diminuirá, na mesma direção, pois estão conectados por uma proporcionalidade qualitativa (P+), e com os mesmos valores qualitativos de magnitude e de derivada, posto que possui a correspondência Q entre essas duas quantidades.

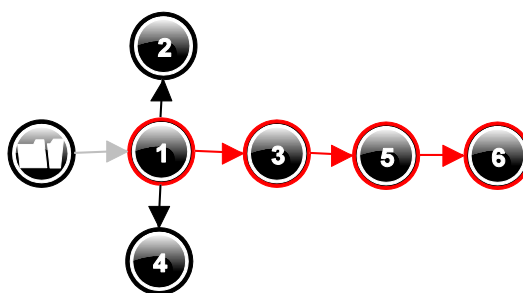
O modelo também mostra a relação entre a *Taxa de evaporação* e a *Energia cinética do vapor*, conectadas pela influência direta (I+). Dessa forma, quando a *Taxa de evaporação* é positiva, a *Energia cinética do vapor* vai aumentar, até certo limite, pois com o efeito da retroalimentação, vai se estabilizar em determinado momento (Figura 7).

E se *Energia cinética do vapor* aumenta, a quantidade *Vapor de água* aumenta na mesma direção. É importante ressaltar que, como *Energia cinética do vapor* e *Vapor de água* estão conectadas pela correspondência Q, essas duas quantidades variam com os mesmos valores qualitativos, tanto de magnitude quanto de derivada.

É necessário ressaltar o significado da correspondência inversa (Q↓) entre a *Energia cinética do vapor* e a *Energia cinética do líquido*. Nesse caso, a Q↓ tem dois significados: 1- o primeiro, em relação ao próprio aspecto conceitual da linguagem de modelagem, em que os valores mudam simultaneamente de forma inversa entre as duas quantidades; 2- o segundo, em relação conhecimento específico de Ciências/Química, em que representa a transferência de energia do líquido para o vapor.

Ao rodar esta simulação, *DynaLearn* tem-se o Grafo gerado, com seis estados, na Figura 6, com a trajetória de comportamento selecionada. Faz-se necessário pontuar que um Grafo de Estados, em *DynaLearn*, é uma representação gráfica que identifica diferentes trajetórias pelas quais um sistema pode passar ao longo do tempo. Na Figura 6, selecionamos a trajetória central, com maior número de estados para entendermos as mudanças ocorridas no processo de evaporação.

**Figura 6** – Grafo de estados do modelo “Evaporação com trocas de energia”.

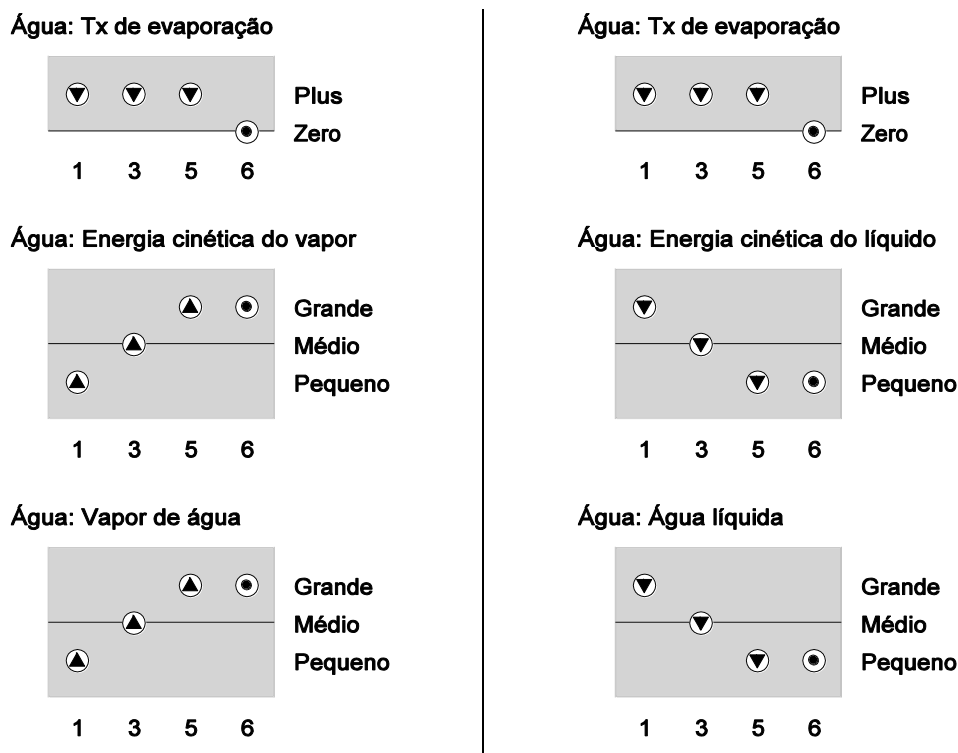


Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

Os valores assumidos por todas as quantidades representadas no modelo durante a simulação são apresentados na Figura 7, no VHD. É importante destacarmos que o VHD apresenta graficamente a evolução dos valores de uma variável ao longo do tempo. Ele é utilizado para acompanhar e visualizar as mudanças em cada um dos estados, das

variáveis presentes no modelo. Desse modo, o VHD, disponível na Figura 7, permite compreender a história dos valores das quantidades, referentes aqueles estados selecionadas no Grafo (mostrados na Figura 6): [1] → [3] → [5] → [6].

**Figura 7** – VHD do modelo “Evaporação com trocas de energia”.



Fonte: imagens geradas em *DynaLearn*.

A simulação completa gera seis estados, sendo um estado inicial e três estados finais. Na trajetória escolhida [1, 3, 5, 6], a *Taxa de evaporação* apresenta magnitude ‘Plus’ (positiva), mas derivada decrescente, que permanece nos estados [1, 3, 5], até chegar à magnitude ‘Zero’ e estável, no estado 6. Essa taxa estabilizou porque é controlada pelo mecanismo de retroalimentação balanceadora. A quantidade influenciada pelo I+ da referida taxa, *Energia cinética do vapor*, inicia a trajetória com valor ‘Pequeno’ e crescente, passando pelo estado 3, com valor ‘Médio’, e chegando em ‘Grande’, no estado 5, no qual se estabiliza no último estado dessa trajetória, [6]. O *Vapor de água* muda, durante a trajetória, com os mesmos valores da sua influenciadora, *Energia cinética do vapor*, pois estão conectadas pela correspondência Q. Já a quantidade influenciada pelo I- da referida taxa, inicia a trajetória com valor ‘Grande’ e decrescente, passando pelo estado 3, com valor ‘Médio’, e chegando em ‘Pequeno’, no estado 5, onde se estabiliza no último estado dessa trajetória, [6]. O mesmo acontece com a *Água líquida*, que é alterada de acordo com

ReSBEnQ, Brasília-DF, v. 05, n. 1, 2024, e052407, jan./dez. 2024



os mesmos valores da *Energia cinética do líquido*. Em outras palavras, o fluxo de energia tornou a água líquida em vapor e o processo foi paralisado. O modelo não coloca informações sobre o que poderia ter ocorrido depois.

### ***Ampliando a complexidade: evaporação, condensação e precipitação envolvendo trocas de energia***

Apesar de também envolver trocas de energia, este modelo possibilita explicações plausíveis para a transição de estados físicos da água. É um modelo mais complexo, pois representa dois processos de mudanças de estados físicos (evaporação e condensação) e o processo de precipitação da chuva. O objetivo deste modelo é representar o comportamento cíclico da água entre a atmosfera e a terra. É um modelo que mostra a causalidade atuando em uma única direção, de forma que, em um determinado período, o vapor que está na atmosfera precipitará como chuva; e a água líquida que está na terra, em outro período, vai evaporar, e voltará a ser precipitada.

No Cenário apresentado abaixo, na Figura 8, representamos os processos de evaporação, condensação e precipitação com apenas duas taxas: *Tx evapo-condensação* e *Tx precipi-evaporação*. Isso foi possível porque utilizamos o EQ = {'Plus', 'Zero', 'Minus'} para cada taxa, e esse EQ combina processos antagônicos. Assim, a *Tx evapo-condensação* incide sobre a variável de estado *Água vapor*, e indica a mudança dos estados gasoso para líquido e vice-versa, e que podem ocorrer simultaneamente. A interpretação do significado dos valores dessa Taxa (Tx) é a seguinte

- Se Evaporação > Condensação, *Tx evapo-condensação* = Plus (prevalece a evaporação);
- Se Evaporação = Condensação, *Tx evapo-condensação* = Zero (os dois processos estão em equilíbrio);
- Se Evaporação < Condensação, *Tx evapo-condensação* = Minus (prevalece a condensação).

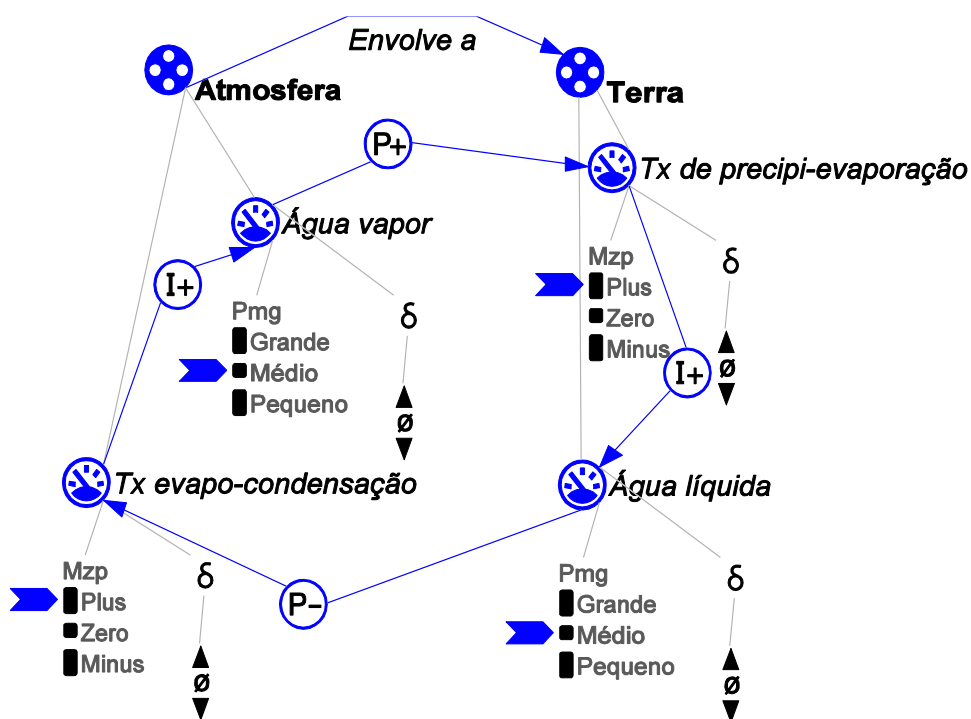
Da mesma forma, a *Tx precipi-evaporação* influencia a variável de estado *Água líquida*, e representa a alternância entre a precipitação (chuva) e a evaporação, e vice-versa. Segue a interpretação dos valores de magnitude da taxa:

- Se Precipitação > Evaporação, *Tx precipi-evaporação* = Plus (prevalece a precipitação);

- Se Precipitação = Evaporação,  $T_x$  precipi-*evaporação* = Zero (os dois processos estão em equilíbrio);
- Se Precipitação < Evaporação,  $T_x$  precipi-*evaporação* = Minus (prevalece a evaporação).

Segue, na Figura 8, o Cenário do modelo "Evapo-condensação e Precipi-*evaporação*". Cabe ressaltar que o Cenário é uma expressão de um sistema com as condições iniciais, variáveis, e relações que serão exploradas durante a simulação. Em essência, o cenário de modelo estabelece o contexto em que o sistema será simulado, permitindo que o usuário teste e observe o comportamento do sistema sob diferentes situações.

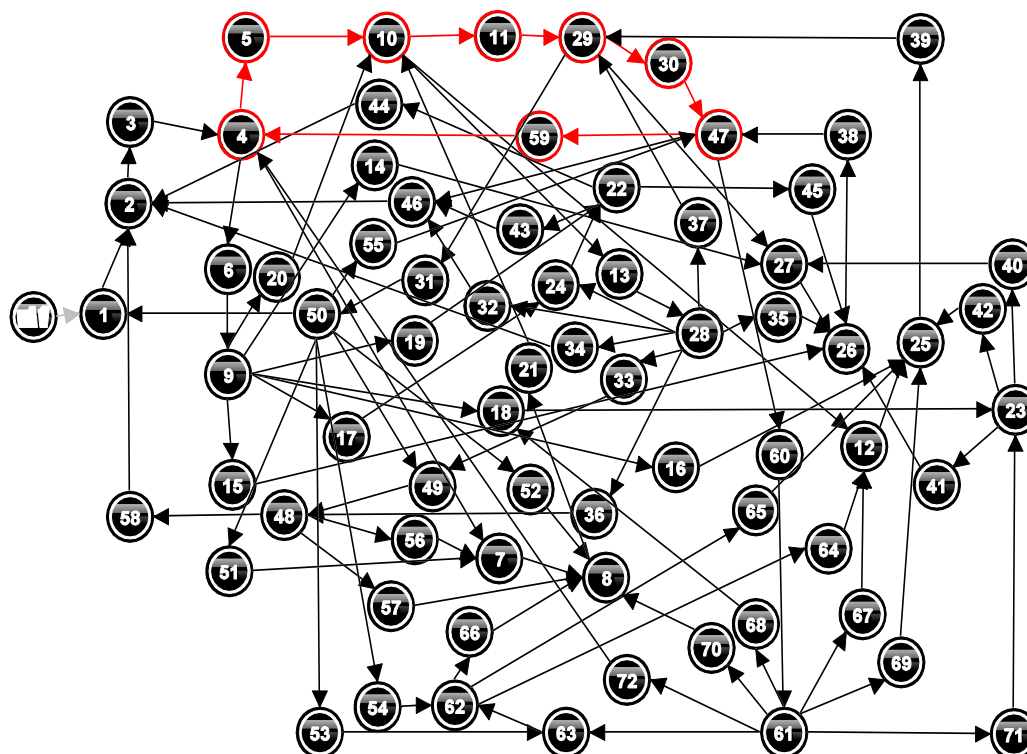
**Figura 8** – Cenário do modelo "Evapo-condensação e Precipi-*evaporação*".



Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

Ao rodar a simulação, o Cenário gera o grafo de 71 estados mostrados na Figura 9.

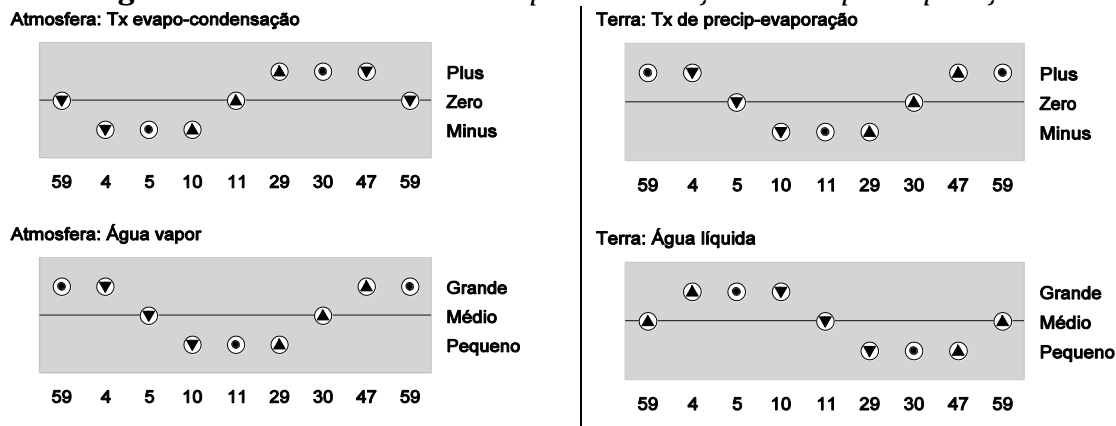
**Figura 9** – Cenário do modelo “Evapo-condensação e Precipi-evaporação”.



Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

Conforme mencionado, os Grafos mapeiam diferentes estados, por meio de trajetórias, pelos quais um sistema pode passar ao longo do tempo, juntamente com as transições entre esses estados, que ocorrem devido a eventos ou ações. No caso da Figura 9, tivemos um expressivo número de estados, devido à complexidade do modelo. Quanto mais complexo é o modelo, maior será o número de trajetórias geradas e, portanto, maior será o número de estados. Os valores assumidos por todas as quantidades durante a simulação, na trajetória selecionada, são apresentados na Figura 10.

**Figura 10** – VHD do modelo 'Evapo-condensação e Precipi-evaporação'.



Fonte: imagem gerada em *DynaLearn*.

Podemos perceber, na Figura 10, que à medida que a simulação avança, o diagrama exhibe como os valores das variáveis mudam, ajudando a entender o comportamento dinâmico do sistema. Em vez de focar em números exatos, o VHD se concentra em mostrar variações qualitativas, como tendências de aumento, diminuição ou estabilidade, tornando-se uma ferramenta poderosa para visualizar como mudanças em uma variável afetam outras e o sistema como um todo.

O VHD das quatro quantidades associadas às entidades ‘Atmosfera’ e ‘Terra’ mostram o comportamento sinusoidal. Pode-se notar que a alternância de predominância de processos como evaporação e condensação e posterior precipitação criam um certo atraso entre as mudanças de volume do vapor atmosférico (*Água vapor*) e da água em estado líquido em terra (*Água líquida*).

Nos estados [11] e [59], na atmosfera a taxa *Tx evapo-condensação* tem magnitude ‘Zero’ e, na terra, a *Tx precipi-evaporação* tem magnitude ‘Zero’ nos estados [5] e [30]. Esses estados indicam o fim da predominância de um processo e início da predominância de outro. É o que mostra o quadro 1, abaixo:

**Tabela 1** – Valores da trajetória do comportamento do sistema.

		Trajetória do comportamento do sistema							
Entidades	Quantidades	[4]	[5]	[10]	[11]	[29]	[30]	[47]	[59]
Atmosfera	<i>Tx Evap-Cond</i>	Minus, Decresce	Minus, Zero	Minus, Cresce	Zero, Cresce	Plus, Cresce	Plus, Zero	Plus, Decresce	Zero, Decresce
	<i>Água Vapor</i>	Grande, Decresce	Médio, Decresce	Pequeno, Decresce	Pequeno, Zero	Pequeno, Cresce	Médio, Cresce	Grande, Cresce	Grande, Zero
Terra	<i>Tx Preci-Evap</i>	Plus, Decresce	Zero, Decresce	Minus, Decresce	Minus, Zero	Minus, Cresce	Zero, Cresce	Plus, Cresce	Plus, Zero
	<i>Água Líquida</i>	Grande, Cresce	Grande, Zero	Grande, Decresce	Médio, Decresce	Pequeno, Decresce	Pequeno, Zero	Pequeno, Cresce	Médio, Cresce

Fonte: os autores (2024).

A análise dos estados [4, 5, 10] mostra que, enquanto na atmosfera o processo de condensação predomina sobre a evaporação, a quantidade de *Água vapor* está diminuindo e sua magnitude vai de ‘Grande’ ([4]) para ‘Pequeno’ ([10]), ao tempo em que começa o processo de evaporação em terra, que dura o período dos estados [10, 11, 29]. Na terra, a *Água líquida* permanece com a magnitude ‘Grande’ durante os estados [4, 5, 10].

Por outro lado, a análise dos estados [29, 30, 47] mostra situação semelhante no ambiente terrestre. O processo de evaporação estava terminando no estado [29], a *Tx*

*precipi- evaporação* tem magnitude 'Zero' no estado [30], e começa a precipitação, que dura nos estados [47, 59, 4]. Na atmosfera, a *Água vapor* mantém a magnitude crescendo nos estados [29, 30, 47]. Essa sequência garante a manutenção do ciclo evaporação e condensação/ precipitação.

No estado seguinte, [11], a *Tx precipi- evaporação* tem valor <Minus, Zero>, e em seguida começa, na terra, o processo de evaporação, que vai colocar água na atmosfera, ao tempo em que reduz a magnitude. Enquanto isso, em terra, o volume de *Água líquida*, com magnitude no intervalo 'Grande', aumenta, estabiliza e diminui devido ao predomínio do processo precipitação sobre a evaporação.

Durante os estados [29, 30, 47], o volume de *Água vapor* aumenta de 'Pequeno' a 'Grande', devido à predominância do processo evaporação sobre condensação, enquanto, em terra, a *Água líquida*, com magnitude no intervalo 'Pequeno', diminui, estabiliza e aumenta, devido ao processo de evaporação sobre precipitação. Note que nos estados [11] e [59], na atmosfera a taxa *Tx evapo- condensação* tem magnitude 'Zero', o que indica fim da predominância de um processo e início da predominância de outro.

Com efeito, o estado [11], indica que o processo de condensação ( $T_x = \text{<Minus, positivo>}$ ), que estava sendo reduzido, se iguala ao processo de precipitação, que começa a aumentar a partir do estado [29]. Da mesma forma, o estado [59] indica que o processo de precipitação ( $T_x = \text{<Plus, negativo>}$ ), que estava sendo reduzido, se iguala ao processo de condensação, que começa a aumentar a partir do estado [4]. Note ainda que nos estados [5] e [30], na terra a taxa *Tx evapo- condensação* tem magnitude 'Zero', o que indica fim da predominância de um processo e início da predominância de outro.

### ***Efeito dos processos de transformação da água: o caso da tempestade***

Um dos grandes potenciais da modelagem qualitativa para o ensino de Química e Ciências é possibilitar a exemplificação dos conceitos explorados nessas áreas do conhecimento, de modo que os estudantes possam construir, ampliar e aplicar os conteúdos em modelos que envolvam processos. Por exemplo, a grande tempestade ocorrida na cidade do Rio de Janeiro, no início de abril de 2019, foi tema de discussão no cenário brasileiro, que sensibilizou a população, especialmente devido às mortes e aos danos sociais e econômicos causados à cidade. Além desse exemplo, ocorreram tragédias envolvendo tempestades, no Brasil, em 2020, 2021, 2022 e em 2023, no Rio Grande do

Sul, que deixou mortes, em diferentes cidades do Estado. Esse fenômeno foi tema do modelo aqui apresentado, a partir da integração dos três outros modelos mostrados anteriormente, sobre a transição dos estados físicos da água.

Devido às variações climáticas, as tempestades estão mais frequentes e mais intensas, principalmente em épocas do ano em que as temperaturas são mais elevadas. Podemos relatar, por exemplo, no Rio de Janeiro, em 2019, foram 20 dias sem chuva, com temperaturas próximas aos 40°C. A atmosfera mais aquecida forma nuvens profundas, que provocam chuvas mais intensas. Com a forte radiação solar, a água do mar também é aquecida e, no dia da tempestade, chegava a 28°C (4°C acima do normal). A evaporação faz com que aumente a umidade do ar (7% a cada grau de aquecimento), formando um 'bolsão de calor' sobre a área urbana.

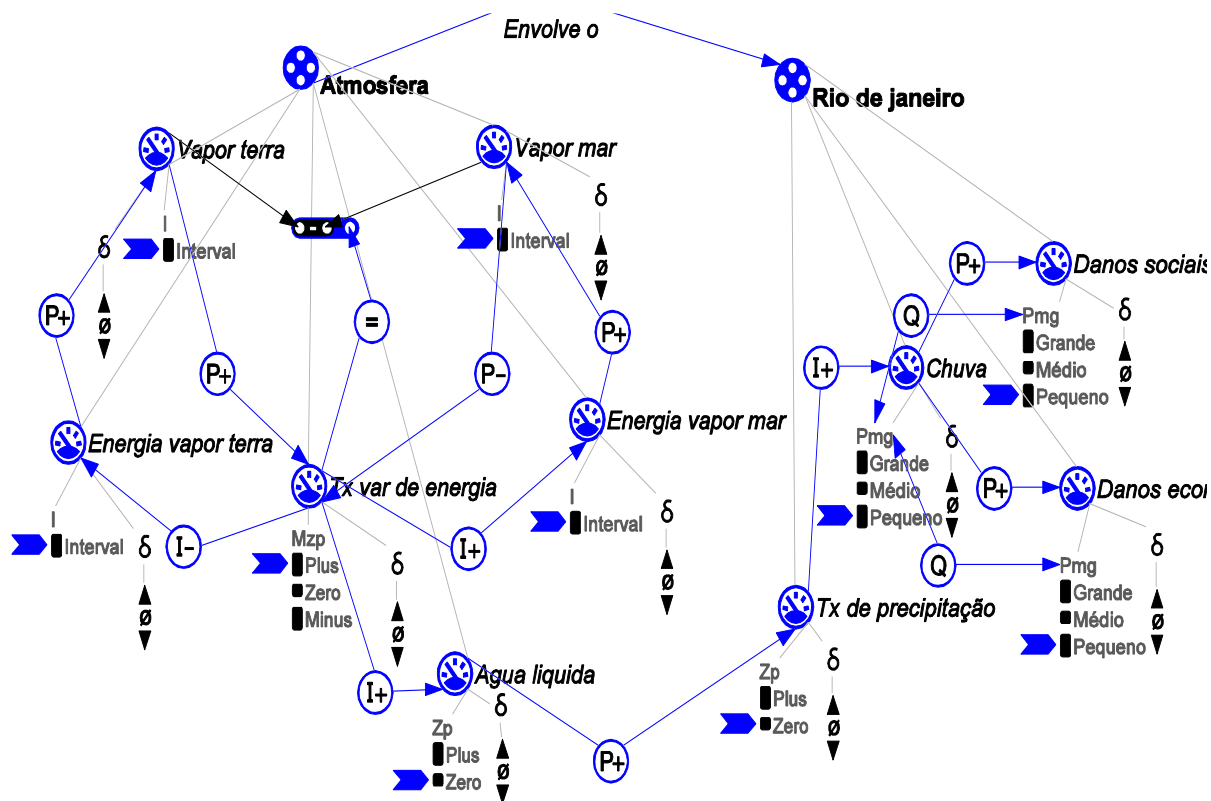
Quando chegou uma massa de ar mais frio vinda do mar e encontrou o bolsão de calor urbano, o choque foi terrível. As explosões causadas na atmosfera eram visíveis pelos satélites, e provocaram uma grande tempestade. Esse dilúvio provocou mortes, deslizamento de encostas, grandes áreas de alagamento, enfim, parou a cidade por muitas horas.

Com base nessas informações e nos modelos sobre as transições entre estados da água e das trocas entre energia cinética da água líquida e a energia do vapor, construímos o modelo Tempestade. Embora seja mais complexo, o modelo foi elaborado a partir de um dos padrões de modelo estudados por Salles et. al. (2012a). O padrão selecionado evidencia uma estrutura que possibilita o cálculo de fluxos (taxas) a partir do balanço de cargas. No caso, a *Taxa de variação de energia* gerada no fenômeno da tempestade pode ser calculada pela diferença entre as energias cinéticas de *Vapor da terra – Vapor do mar*. A *Tx var de energia* representa um processo que influencia três variáveis de estado: (a) a *Tx var de energia* coloca I+ em *Energia de vapor no mar*, e esta, com P+, influencia *Vapor do mar*. Além disso, (b) a *Taxa* influencia com I– a quantidade de *Energia de vapor na terra*, e esta afeta, com P+, o *Vapor na terra*. Ambas as variáveis auxiliares, *Vapor da terra* e *Vapor do mar*, devolvem os efeitos iniciados pelo processo, criando um complexo mecanismo da retroalimentação.

Finalmente, (c) a *Tx de variação de energia* aumenta a quantidade de *Água líquida* na terra, por meio de um I+. *Água líquida* influencia com um P+ a *Tx de precipitação*, que faz aumentar (I+) a *Chuva* na cidade. A quantidade *Chuva* afeta, por sua vez, *Danos sociais*

e Danos econômicos. Chuva está ligada a estas duas quantidades por meio de correspondências. Segue, na Figura 11, o Cenário do modelo "Tempestade".

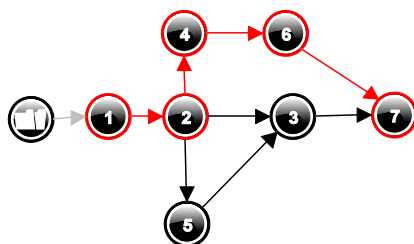
Figura 11 – Cenário do modelo "Tempestade".



Fonte: imagem gerada em DynaLearn.

A Figura 12 apresenta o grafo com sete estados, gerado ao rodar a simulação.

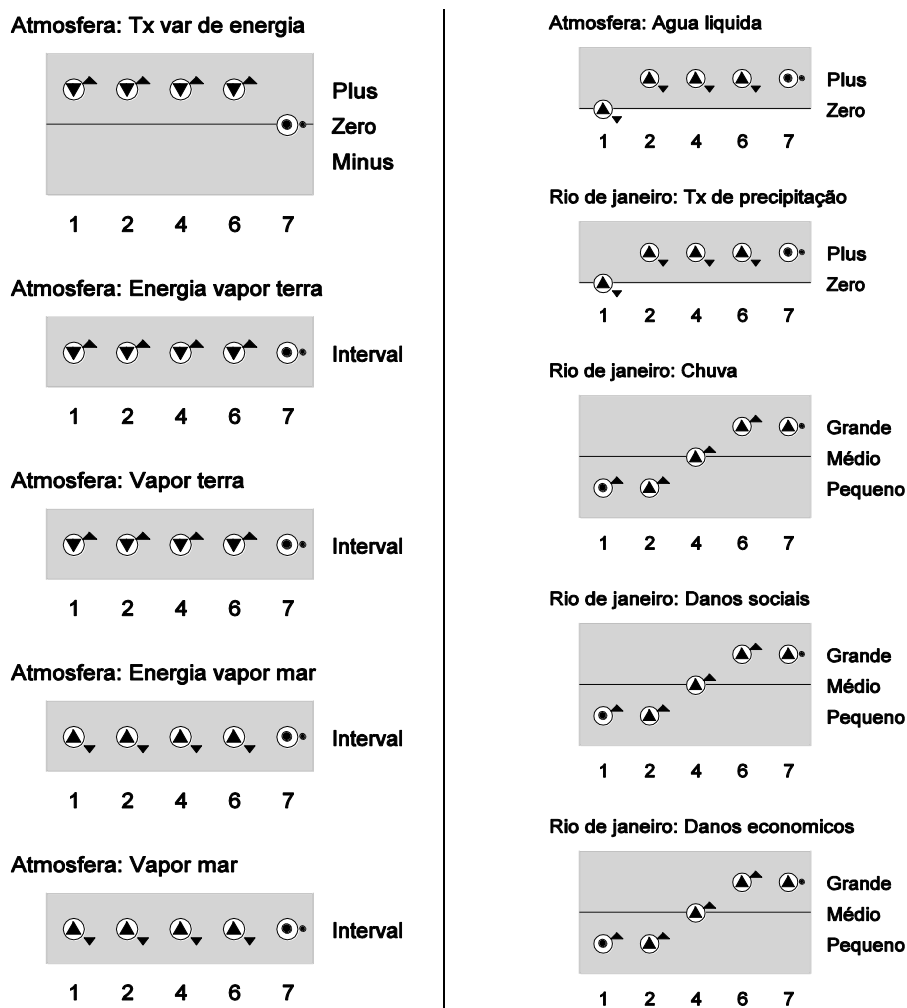
Figura 12 – Grafo de estados gerado no modelo "Tempestade".



Fonte: imagem gerada em DynaLearn.

A simulação do modelo "Tempestade" gera sete estados, com três possíveis trajetórias. Os valores assumidos por todas as quantidades do modelo durante a simulação, representadas na trajetória [1] → [2] → [4] → [6] → [7], são apresentados no VHD, na Figura 13.

Figura 13 – VHD do modelo “Tempestade”.



Fonte: imagem gerada em DynaLearn.

No modelo, é representado um balanço de cargas entre o *Vapor no mar* e o *Vapor na terra*, o que gera *Tx de variação de energia* com valor = <Plus, Negativo> na atmosfera. Como mostra o VHD, essa taxa mantém esse valor nos estados [1, 2, 4, 6]. Com isso, a *Energia de vapor na terra* diminui, pois está sendo influenciada por meio de um I-. A referida quantidade está conectada com *Vapor na terra* por meio de um P+, fazendo com que *Vapor na terra* também diminua. A *Tx de variação de energia* ainda influencia, por meio do I+, a *Energia de vapor no mar*, de tal modo que esta quantidade aumenta nos estados [1, 2, 4, 6]. Esta quantidade influencia, com P+, a quantidade *Vapor no mar*, o que faz esta quantidade aumentar.

Devido à *Tx de variação de energia* estar positiva nos estados [1, 2, 4, 6], a quantidade *Água líquida* vai aumentar, até o estado 6, levando, na mesma direção, a *Tx de precipitação*. No início, estado [1], este processo está inativo, pois a *Tx de precipitação* = <



'Zero', Positivo>. Nesse mesmo estado, a quantidade de *Chuva* está estável, em 'Pequeno'. A partir do estado [2], a *Tx de precipitação* é igual a <'Plus', Positivo>, e a quantidade *Chuva* vai aumentar, passando pela magnitude 'Médio' no estado [4], chegando a 'Grande' no estado [6].

No estado [7], as quantidades *Vapor terra* e *Vapor mar*, influenciados pelos mecanismos de retroalimentação balanceadora, se igualam, e com isso a *Tx var de energia* assume a magnitude 'Zero'. Esse resultado fez com que as quantidades influenciadas por esta taxa (*Energia vapor terra*, *Energia vapor mar* e *Água líquida*) se estabilizem com derivadas 'Zero'. Apenas as quantidades *Chuva*, *Danos Sociais* e *Danos econômicos* terminam a simulação crescendo no estado [7], com derivadas positivas.

### ***Potencialidades e limitações da bancada de modelagem usada neste estudo***

Esta pesquisa nos conduziu por um caminho complexo de construção, planejamento e avaliação de modelos, que demandou um tempo significativo de trabalho na plataforma de modelagem. Reconhecemos diversas potencialidades do *DynaLearn*, como a capacidade de construir e representar sistemas em diferentes níveis de complexidade, conforme já apontado em estudos da literatura nacional, como Souza (2019), Teodoro, Gomes e Silva (2023), e internacional, como Salles et al. (2012) e Bredeweg et al. (2013).

De fato, o *DynaLearn* oferece seis níveis distintos de aprendizagem, que se tornam gradativamente mais complexos. Dessa forma, dependendo do contexto, professores e alunos podem construir modelos em níveis mais simples, como LS1 e LS2. Mesmo nesses níveis iniciais, já é possível representar adequadamente relações de causalidade. Estudos anteriores mostram o potencial da modelagem em níveis mais básicos (como LS1 e LS2), tanto no Ensino Fundamental quanto no Ensino Médio (Teodoro, Salles & Gauche, 2024).

Além disso, esta pesquisa identificou algumas limitações para o desenvolvimento de atividades de modelagem nas escolas de Educação Básica. É prudente afirmar que as condições de trabalho dos professores influenciam diretamente a implementação de atividades como essa. A modelagem qualitativa é uma prática computacional, o que exige o uso de computadores em pleno funcionamento e com acesso à internet. Ademais, os professores precisam de tempo para planejar adequadamente as atividades. O *DynaLearn* é uma ferramenta poderosa para a representação de sistemas dinâmicos; no entanto, seu uso requer um período considerável de aprendizado, dedicação e trabalho para a construção de modelos. Conforme apontado por

Teodoro, Salles e Gauche (2024), é fundamental envolver os professores no processo de modelagem qualitativa para que essa ferramenta atinja seu pleno potencial e colabore efetivamente na educação científica.

Outro aspecto relevante é que o *DynaLearn*, atualmente, está disponível apenas na língua inglesa. Conforme estudos anteriores indicam (Souza, 2019), os estudantes da Educação Básica encontram dificuldades iniciais para se familiarizar com as funcionalidades da plataforma nessa língua. Acreditamos que, em breve, o *DynaLearn* estará disponível em português e outros idiomas, já que, em parceria com pesquisadores de outros países, estamos colaborando na tradução dos comandos para a língua portuguesa.

### **Considerações finais**

Apresentamos, neste estudo, os resultados de quatro simulações baseadas em técnicas de IA, que representam as trocas de energia nas transições dos estados físicos da água. Mostramos como ocorre a transição dos estados físicos da água com o aumento e a diminuição da temperatura. Além disso, representamos os processos envolvidos nessa transição: evaporação, condensação e precipitação, relacionados às trocas de energia. Em seguida, exemplificamos um fenômeno de grande repercussão no Brasil: o caso das tempestades.

Cabe destacar que os processos aqui modelados (evaporação, condensação e precipitação) foram escolhidos para serem representados pela sua condição *sine qua non* na explicação do fenômeno da tempestade. No entanto, outros exemplos de modelos envolvendo a troca de energia, na transição dos estados físicos (por exemplo, a fusão e a solidificação), podem ser encontrados em Souza (2019).

É importante notar que os modelos foram elaborados, inicialmente, de forma mais simples, e, posteriormente, os conceitos e estruturas do modelo foram aplicadas em situações reais e mais complexas. Os modelos possibilitaram que as relações de causalidade, os processos envolvidos e os mecanismos de retroalimentação (nos modelos envolvendo as trocas de energia) fossem devidamente explicitados. Esses modelos podem ser instrumentos para futuras pesquisas na Educação em Química.

Discutimos, ainda, as potencialidades e limitações do simulador utilizado: o *DynaLearn*. A bancada de modelagem *DynaLearn* se mostrou uma plataforma potente

para representar sistemas dinâmicos, especialmente por permitir que professores e estudantes trabalhem com diferentes níveis de complexidade. No entanto, desafios como a necessidade de recursos tecnológicos adequados, tempo para planejamento e a própria barreira linguística relacionada ao uso da plataforma em inglês ainda precisam ser superados para uma implementação ampliada da modelagem nas escolas. Acreditamos que, com o avanço das traduções e da adaptação da ferramenta para o português (que já estão acontecendo por meio das colaborações de pesquisadores do Brasil e de outros países), bem como o desenvolvimento de estratégias de formação docente, será possível ampliar o uso da modelagem qualitativa nas escolas, promovendo uma educação científica também com o uso de *DynaLearn*.

Este texto sinaliza caminhos enriquecedores para o ensino de Química/Ciências contextualizado, numa perspectiva que amplia discussões sobre a transição de estados físicos da matéria, para além de memorizações dos fenômenos, de tal modo que o estudante pode, de fato, compreender o funcionamento desses processos, bem como os fenômenos envolvidos. Nesse contexto, a modelagem qualitativa amplia a visão de mundo dos estudantes e contextualiza as situações-problemas.

## Referências

- Bredeweg, B., Liem, J., Beek, W., Linnebank, F., Gracia, J., Lozano, E., ... & Mioduser, D. (2013). DynaLearn – An Intelligent Learning Environment for Learning Conceptual Knowledge. *AI Magazine*, 34(4), 46-65.
- Forbus, K. D., & de Kleer, J. (1993). *Building Problem Solvers*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gamboa, S. F. (2007). Pesquisa teórica: uma reflexão epistemológica e sua importância na produção do conhecimento. *Revista Diálogo Educacional*, 7(21), 87-103.
- Globoplay. Como o Brasil e o mundo estão se preparando para nova realidade do clima? Recuperado em 09 de outubro de 2024, de <https://globoplay.globo.com/v/7540228/>
- Leal, M. C. (2010). *Didática da Química: Fundamentos e práticas para o ensino médio*. Belo Horizonte.
- Ribeiro, A. A., & Greca, I. M. (2003). Simulações computacionais e ferramentas de modelização em educação química: uma revisão de literatura publicada. *Química Nova*, 26(4), 542-549.

Rykiel, E. J. (1996). Testing Ecological Models: the Meaning of Validation. *Ecological Modelling*, 90, 229-244.

Salles, P., Bredeweg, B., Noble, R., Zitek, A., & Souza, A. B. (2012). Qualitative Model Patterns: a Toolkit for Learning by Modelling. In *26th International Workshop on Qualitative Reasoning*, Playa Vista, CA, USA (Vol. 1).

Teodoro, P. V., Salles, P., & Gauche, R. (2023). A Qualitative Model of the evaporation process for science education. In *15th Conference of The European Science Education Research Association (ESERA)*, Capadócia, Turkey. Esera Conference Proceedings.

Teodoro, P. V., Gomes, D. C. M., & Silva, L. R. R. (2023). A Inteligência Artificial a partir do Raciocínio Qualitativo: panorama de materiais didáticos no Ensino de Ciências Naturais. *Boletim de Conjuntura*, 16, 378-390.

Teodoro, P. V., Salles, P., & Gauche, R. (2024). System dynamics through qualitative modeling in DynaLearn: Results from research conducted in a Brazilian high school context. In A. M. Olney, I.-A. Chounta, Z. Liu, O. C. Santos, & I. Bittencourt (Eds.), *Communications in computer and information science* (Vol. 2151, pp. 251-258). Springer Nature Switzerland.

Tiedemann, P. W. (1998). Conteúdos de Química em Livros Didáticos de Ciências. *Ciência & Educação*, 5(2), 15-22.

Oliveira, A. C. G., & Petrucci-Rosa, M. I. (2016). Recontextualizações e hibridismos em processos de elaboração e avaliação de Livros Didáticos de Química. *Química Nova na Escola*, 38(3), 273-283.

Souza, P. V. T. (2019). *Modelos de simulação qualitativos como estratégia para o ensino de Ciências* (Tese de doutorado, Universidade de Brasília).

Souza, P. V. T., Salles, P., & Gauche, R. (2017). Um modelo de simulação baseado em raciocínio qualitativo para a educação em ciências. *ACTIO: Docência em Ciências*, 2, 162-183.

**Submetido em:** 18/05/2024    **Aceito em:** 12/11/2024    **Publicado em:** 15/11/2024

Periódico organizado pela Sociedade Brasileira de Ensino de Química – SBEnQ



Este texto é licenciado pela Creative Commons Attribution 4.0 International License.