

Cartão do Professor

Experiências de pirotecnia com matérias-primas críticas



Index

Introdução Geral	2
Informação Adicional.....	2
Objetivos de Aprendizagem	8
Quadro Europeu de Competências Chave	8
Objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas	9
Conteúdos – Princípios Teóricos.....	10
Procedimento Laboratorial	12
Caminho de Aprendizagem	12
Avaliação.....	13
Descrição dos Cartões de Aluno	13
Fontes	14
Agradecimentos	14

Cartão do Professor

Introdução Geral

Este toolkit dará aos alunos a oportunidade de estudar as reações pirotécnicas, assim como a exploração da produção da cor em todas as reações químicas dedicadas a espetáculos visuais como fogos de artifício ou espetáculos de magia.

O público-alvo são alunos entre os 14 e os 18 anos, porque é aconselhável ter algum conhecimento físico-químico prévio.

Pirotecnia é a ciência e a arte de usar materiais capazes de sofrerem reações químicas exotérmicas, autocontidas e autossustentadas para produzir calor, luz, gás, fumo e/ou som. A característica mais importante nesta experiência de laboratório é a produção de cor. Esta pode ser gerada por dois fenómenos: luminescência e incandescência. A área pirotécnica pode ser aplicada em fogos de artifício, indústria marítima e automotiva, mineração, agricultura, pecuária, sinalização e localização.

Neste toolkit, os alunos aprenderão como aplicar conhecimentos químicos básicos para produzir efeitos visuais com sais específicos (alguns deles matérias-primas críticas) por meio de combustão. Essencialmente, uma quantidade específica de sal é dissolvida em metanol e inflamada.

Palavras-chave:

Combustão, incandescência, luminescência, pirotecnia

Informação Adicional

INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Pirotecnia são todos os dispositivos preparados para reações químicas específicas que produzem efeitos diversos, utilizados, entre outras aplicações, em espetáculos pirotécnicos.

A pólvora pode ser considerada a primeira pirotecnia. De acordo com diversos estudos históricos foi descoberta na China. Uma famosa lenda narra que um chef descobriu a pólvora ao cozinhar junto sulfureto, salitre e carvão (todos elementos utilizados na culinária da época) dando origem a uma mistura que, ao entrar em contato com um ambiente de ignição, deixava claras as suas características explosivas. Porém, a hipótese mais aceite afirma que durante o século VII um monge chamado Li Tang, da cidade de Liu Yang, criou a primeira mistura explosiva chamada pólvora negra, e devido a esta descoberta, todos os dias 8 de abril na China são feitas ofertas a Li Tang.

Cartão do Professor

Após a sua descoberta, a pólvora foi desenvolvida na China e introduzida em fenómenos pirotécnicos, primeiro para eventos sociais e, mais tarde, para fins bélicos. A pólvora chegou à Europa por volta do século XIII, através da Rota da Seda. No Velho Continente, pessoas de países como a Itália, especialmente em Florença, foram pioneiras na indústria de fogos de artifício desde o século XV. A espetacularidade do fogo-de-artifício atingiu o seu apogeu no século XIX, destacando-se a sua vasta gama de cores.

Porém, com o passar do tempo, a pólvora perdeu importância no campo da guerra, pois hoje existem outras substâncias com maior poder explosivo.

CIÊNCIA DA PIROTECNIA

A pirotecnia acontece devido a reações químicas que ocorrem no interior dos dispositivos pirotécnicos. Na maioria dos casos provocam os seguintes efeitos: chamas, fumo e faíscas. Em certos dispositivos pirotécnicos também ocorrem reações explosivas controladas que desencadeiam outro efeito típico, a explosão.

A pirotecnia baseia-se nas reações químicas de redução e oxidação (reações redox) produzidas entre o oxigénio e os combustíveis. Uma reação redox consiste numa reação química na qual ocorre uma troca de eletrões. Uma substância perde eletrões e é oxidada (neste caso, combustível) e outra substância ganha eletrões e é reduzida (oxigénio). Para que esta reação ocorra, são necessários quatro elementos conhecidos como tetraedro do fogo

Tetraedro do Fogo

- Combustível (agente redutor): mistura inflamável que compõe o dispositivo pirotécnico. Eles representam o combustível da combustão e reagem com o oxigénio libertado pelos oxidantes, produzindo enormes quantidades de gás a temperaturas elevadas. Entre os agentes redutores mais comuns utilizados em pirotecnia estão o enxofre (S) e o carbono (C), que reagem com o oxigénio para formar dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de carbono (CO_2). Esses dois elementos, juntamente com o nitrato de potássio, normalmente dão origem à pólvora negra, utilizando-os nas percentagens adequadas.
- Oxidante (agente oxidante): Normalmente oxigénio. Os agentes oxidantes são os elementos responsáveis por gerar o oxigénio necessário para produzir a reação de combustão da mistura pirotécnica. São sais metálicos compostos por aniões com um catião metálico. Os principais tipos distintos de oxidantes conhecidos são os seguintes: cloratos (ClO_3^-), nitratos (NO_3^-) e percloratos (ClO_4^-). É típico que esses aniões pré-formem um sal com potássio (K^+).
- Calor: Energia de ativação do combustível. Os agentes responsáveis por fornecer o calor são chamados de agentes de ativação. Ou seja, produzem a ignição em dispositivos pirotécnicos, responsáveis por fornecer o calor e a energia de ativação necessários para que a reação inicie o seu curso, e assim poder atingir os efeitos desejados com cada tipo de artifício.

Cartão do Professor

- Reação em cadeia: o processo que permite o progresso da reação mistura-combustível.

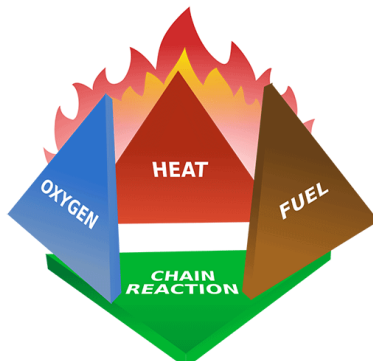


Figura 1. Teatraedro do fogo

Tipos de reações

Nas reações de redução e oxidação, vários níveis são diferenciados dependendo da energia liberada e da velocidade da reação.

1. Combustão: é uma reação que produz a emissão de luz (chama) e calor. A taxa de reação não é notavelmente alta.
2. Deflagração: A taxa de reação é extremamente elevada, embora com valores inferiores à velocidade do som, inferiores a 300 m/s.
3. Detonação: É uma reação com velocidade de propagação supersônica, superior a 300 m/s de som, e capaz de atingir em caso de alta detonação até 9.000 m/s.

Os dois últimos níveis de oxidação são chamados de explosões porque uma grande quantidade de gás é libertada a alta pressão num intervalo de tempo muito curto e a energia libertada é transmitida por uma onda de choque.

Componentes Adicionais

Além destas substâncias básicas das composições pirotécnicas, são adicionados às misturas outros complementos que modificam as características de combustão.

1. Substâncias catalisadoras: aquelas capazes de acelerar ou desacelerar a reação dependendo do tipo de elemento. Estes podem desencadear uma explosão, gerando um aumento na velocidade da reação.
2. Substâncias aglutinantes: conferem à composição pirotécnica uma forte coesão, que consolida a estabilidade da mistura durante o armazenamento. Além disso, aumentam a resistência a qualquer tipo de solvente. Dextrina e goma arábica são as mais comuns.
3. Substâncias decorativas:
 - Efeitos sonoros e sibilantes: o primeiro deles é causado pela libertação muito rápida de gás em alta pressão, e cujas composições geralmente são formadas por perclorato e clorato. O último é conseguido com composições formadas por

Cartão do Professor

benzoatos ou salicilatos, ou ainda com composições de pólvora negra (nitrato de potássio, C e S). É vedado por um tampão com bico que, ao expelir os gases, é o culpado pela emissão do efeito de assobio.

- Efeitos visuais: sais e elementos metálicos são os elementos que, a uma determinada temperatura de reação, darão origem a efeitos tão marcantes quanto aqueles que serão apreciados na prática laboratorial. Dependendo do(s) elemento(s) adicionado(s) à reação de combustão, uma cor específica pode ser obtida. Estes elementos devem ser utilizados isentos de impurezas, pois podem prejudicar o efeito colorido final com emissões parasitas.

Tabela 1. Quadro de emissões de cor

COR	ELEMENTO QUÍMICO
Amarelo	Sais de sódio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, NaNO_3 ...)
Vermelho	Sais de estrôncio (SrCO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$...)
Azul	Sais ou óxidos de cobre (CuO , CuCl ...)
Verde	Sais de bário (BaCl_2 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$...)
Branco	Sais ou ligas de Alumínio e Magnésio (Al, Mg)
Dourado	Ferro (Fe)
Violeta	Mistura de sais de estrôncio e cobre (SrCO_3 , CuCO_3 ...)
Laranja	Sais de cálcio (CaCO_3 , CaCl_2 ...)
Prateado	Tiânio (Ti)

FENÓMENO VISUAL

Os dois fenómenos que produzem efeitos visuais impressionantes em pirotecnia são a incandescência e a luminescência.

- Incandescência: geração de luz colorida devido à energia térmica dos elementos submetidos à reação. Quando o corpo emissor atinge uma determinada temperatura, emite radiação que, dentro do espectro visível e comprimento de onda adequado, dá origem à emissão de luz da cor desejada. Começa com a cor vermelha da faixa infravermelha e, à medida que a temperatura aumenta, vai adotando cores mais amareladas, até chegar ao branco. Este fenómeno só atinge cores quentes. A justificação

Cartão do Professor

para isso é que quando a cor branca é obtida devido às altas temperaturas, o composto começa a desintegrar-se.



Figura 2. Espectro visível de Incandescência

- **Luminescência:** Processo químico pelo qual os eletrões dos catiões metálicos produtores de calor são excitados ao receberem uma grande quantidade de energia. Esses eletrões atingem um nível de energia mais alto. Como não são estáveis nesse nível de energia, eles retornam ao estado fundamental, emitindo energia na forma de fótons com um espectro de cores característico de cada elemento denominado espectro de emissão. Quanto maior o salto de energia, mais frias serão as cores emitidas. O fenómeno pode emitir luz colorida tanto a altas quanto a baixas temperaturas, atingindo assim todas as cores do espectro visível dependendo do comprimento de onda da radiação emitida.

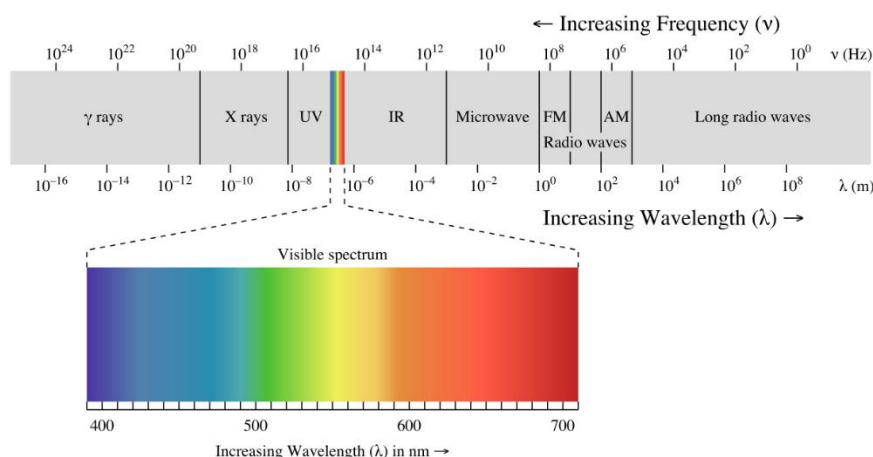


Figura 3. Espectro visível de luminescência.

RELAÇÃO COM AS MATÉRIAS-PRIMAS CRÍTICAS

As matérias-primas são essenciais para produzir uma ampla gama de produtos e serviços de uso diário. A aceleração dos ciclos de inovação tecnológica e o rápido crescimento nas economias emergentes levaram a um aumento da procura global de determinados metais e minerais. Garantir o acesso a um fornecimento estável de muitas matérias-primas tornou-se um grande desafio para as economias nacionais e regionais que têm uma produção limitada. A União Europeia (UE) depende da importação de muitos destes minerais e metais necessários à indústria,

Cartão do Professor

incluindo muitas das matérias-primas críticas. Em 2008, a Comissão Europeia lançou a “Iniciativa Europeia para as Matérias-Primas”, que consistia em:

- Garantir um fornecimento justo e sustentável de matérias-primas dos mercados internacionais.
- Promover o abastecimento sustentável na UE.
- Promover o uso eficiente de recursos e promover a reciclagem.

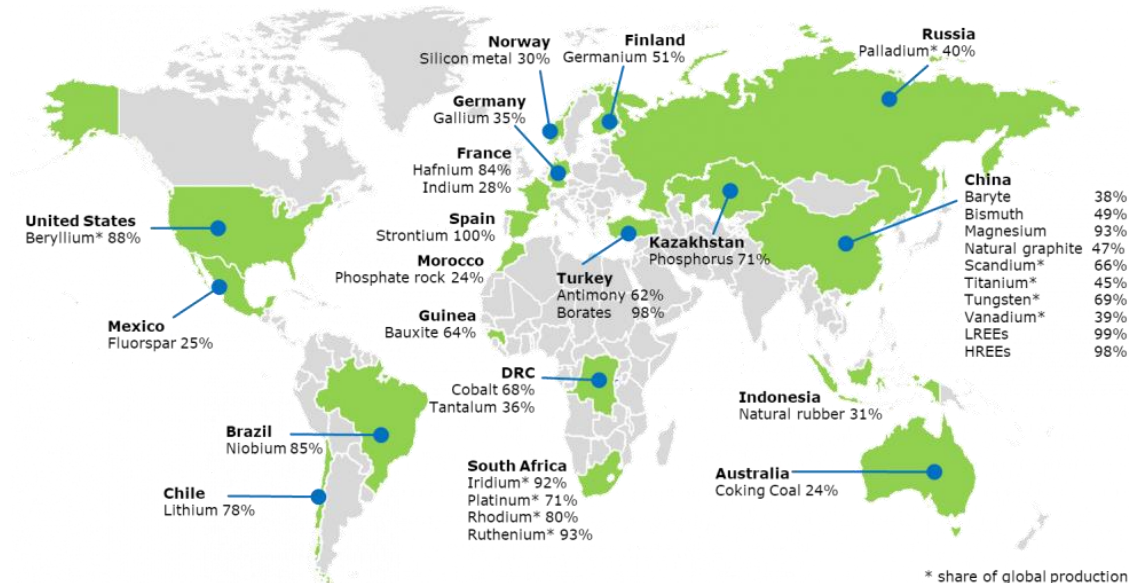


Figura 4. Produção de Matérias-primas críticas.

As matérias-primas críticas utilizadas na pirotecnia são principalmente titânio, estrôncio, bário, fósforo, alumínio e magnésio, que são utilizados principalmente para fins visuais. Nesta prática, ao invés da utilização destes elementos e pirotecnia, por questões de segurança, será realizada uma combustão com metanol e sais metálicos. Alguns dos sais utilizados também contêm matérias-primas essenciais, como lítio e boro.

- O nitrato de estrôncio, além da pirotecnia, é utilizado para sinalização ferroviária e fórmulas de balas tracejantes. O hidróxido de estrôncio forma diversos ácidos orgânicos, sabões e gorduras de estrutura estável, resistentes à oxidação e decomposição numa ampla faixa de temperaturas. Os principais minerais são a celestite (SrSO_4) e a estrontianite (SrCO_3). Espanha é o país com maior produção deste mineral e possui a maior mina de estrôncio.
- Os compostos de bário são obtidos pela mineração e pela conversão de dois minérios de bário. A barite, ou sulfato de bário, é o principal mineral e contém 65,79% de óxido de bário. É utilizado em pirotecnia, indústrias de petróleo e gás, tintas, tijolos, telhas, vidro e borracha.
- O lítio é o metal sólido mais leve. Possui alta condutividade térmica, alto calor específico e densidade muito baixa. Os principais usos do lítio são a produção de vidro e cerâmica, graxas lubrificantes, produção de cimento, baterias recarregáveis, ligas Al-Li, melhoria da

Cartão do Professor

resistência e fabricação de produtos farmacêuticos. Os principais produtores são o Chile e a China.

- O boro é um elemento não metálico. Melhora a resistência química, térmica e à água. É um macronutriente essencial para o crescimento das plantas, o rendimento das culturas e o desenvolvimento das sementes. Além disso, melhora a remoção de manchas e o branqueamento. Os principais usos são isolamento de vidro (vidro corta-fogo), em fritas e cerâmicas, fertilizantes e detergentes. É produzido principalmente na Turquia, Estados Unidos e Chile.

Objetivos de Aprendizagem

No final da aula, os alunos serão capazes de saber:

- O tetraedro do fogo.
- Combustão (redox) e reações pirotécnicas.
- Os conceitos de Luminescência e incandescência e a geração de cor.

Quadro Europeu de Competências Chave















Competências literárias
S1. Capacidade de compreender e interpretar conceitos, emoções, factos e opiniões oralmente e por escrito.
S2. Capacidade de expressar conceitos, emoções, factos ou opiniões oralmente e por escrito.
Competências multilinguísticas
S1. Capacidade de perceber e interpretar conceitos, emoções, factos e opiniões em forma escrita e oral.
S2. Capacidade de expressar conceitos, emoções, factos e opiniões em forma escrita e oral.
S5. Conhecimento de vocabulário, gramática e linguagem.
S7. Capacidade de usar linguagem técnica de acordo com a área de trabalho.
Competências matemáticas e competências em ciência, tecnologia e engenharia
S3. Capacidade de modelar matematicamente uma situação do mundo real e de transferir conhecimentos matemáticos para contextos não matemáticos.
S5. Capacidade de pensamento quantitativo.
S6. Capacidade de extrair informações qualitativas de dados quantitativos.
S8. Capacidade de conceber estudos experimentais e observacionais e analisar os dados deles
Competências digitais

Cartão do Professor

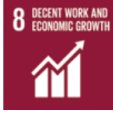




S4. Capacidade de usar e manejar ferramentas tecnológicas e máquinas.
Competências pessoais, sociais e aprender a aprender
S3. Capacidade de ganhar processos e assimilar novo conhecimento, técnicas e qualificações necessárias para objetivos de carreira.
Competências de cidadania
S3. Capacidade de trabalhar efectivamente e colaborar com outros membros da equipa.
Competências empreendedorísticas
S1. Consciência do património local, nacional, Europeu e do seu papel no mundo.
Sensibilidade cultural e competências de expressão
S3. Capacidade de planear e gerir tarefas.

Objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas

Os objetivos de desenvolvimento sustentável são o plano para obter um futuro melhor e mais sustentável para todos. Eles referem-se aos desafios globais que atravessamos, incluindo os relacionados com a pobreza, desigualdade, alterações climáticas, degradação Ambiental, paz e justiça.

		Enable access to basic services		Equal access to global expertise
		Safe medical devices		Sustainable urbanization
		Access to education		Responsible consumption and production
		Less hardship, more opportunities		Strengthen resilience, reduce disaster impact
		Safe and affordable water		Reduce marine pollution
		Energy — the golden thread		Sustainable use of terrestrial ecosystems

Cartão do Professor

	Safety of workers and economic growth		Promote peaceful and inclusive societies
	 Resilient infrastructure and sustainable industrialization		Better access to technology and innovation

Conteúdos – Princípios Teóricos

Uma reação pirotécnica pode ser definida como uma reação química de combustão, deflagração ou detonação na qual são consumidos principalmente combustível e oxigênio, produzindo calor, luz, som e elementos residuais.

Os princípios pirotécnicos serão explicados usando a pólvora negra como exemplo. No entanto, devido ao alto risco de deflagração que causa temperaturas extremamente altas, durante a experiência de laboratório, serão utilizados diferentes sais dissolvidos em metanol (ver procedimento de laboratório) para ilustrar a geração das diferentes cores.

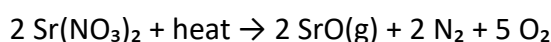
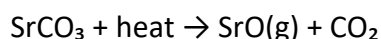
A pólvora negra é normalmente composta de nitrato de potássio (75%), carvão (15%) e enxofre (10%).



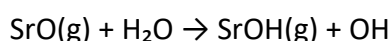
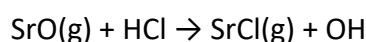
Para atingir o fenómeno da luz, são adicionados sais de estrôncio ou bário.

Estrôncio

Este elemento é normalmente utilizado para obter a cor vermelha em reações pirotécnicas. O efeito visual é conseguido com o fenómeno da luminescência. A energia necessária para atingir este fenómeno é obtida graças à sucessão de reações químicas exotérmicas. O primeiro passo é a vaporização do metal quando atinge a temperatura certa. É composto por carbonato e nitrato de estrôncio.



Aproveitando este óxido de estrôncio e o vapor de água ou ácido clorídrico resultante (depende da reação oxidante/combustível), forma-se a substância produtora de cor.



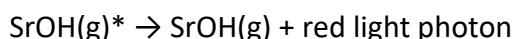
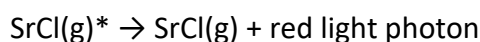
Cartão do Professor

Mais uma vez, é graças ao calor libertado pela reacção oxidante/combustível que a substância produtora de cor absorve essa energia, passando para um estado de excitação, que a leva a subir de nível energético:



Onde * representa a excitação do eletrão

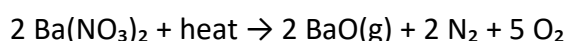
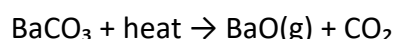
Finalmente, após a excitação, o eletrão fica num estado de energia instável e liberta o excesso de energia até voltar ao seu estado fundamental na forma de um fóton luminoso, expresso da seguinte forma:



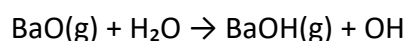
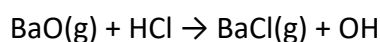
Bário

Este elemento é normalmente utilizado para obter a cor verde em reacções pirotécnicas. O efeito visual é conseguido com o fenómeno da luminescência. A energia necessária para atingir este fenómeno é obtida graças à sucessão de reacções químicas exotérmicas. Seguindo os mesmos passos do Estrôncio:

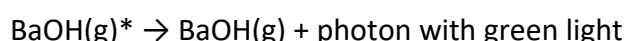
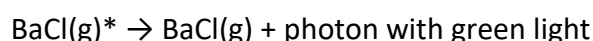
Vaporização: É composta por carbonato e nitrato de bário.



Formação de substâncias produtoras de cor:



Depois de absorver a substância produtora de calor proveniente da reacção oxidante/combustível e sofrer excitação, ocorre a desexcitação onde o fóton de luz luminosa verde é libertado.



Cartão do Professor

Procedimento Laboratorial

A atividade teórica anterior descrita no capítulo “Conteúdos teóricos” não pode ser realizada no laboratório escolar devido à complexidade do trabalho com a pólvora, ao equipamento necessário e ao elevado risco de deflagração.

Por esta razão, o procedimento laboratorial consistirá apenas numa combustão mais controlada das soluções. A principal diferença entre a pólvora de estrôncio/bário e as soluções de combustão propostas é que o calor necessário para a pólvora é muito maior. As misturas pirotécnicas (pólvora) causam deflagração, enquanto as soluções de metanol geram uma combustão.

O metanol (CH_3OH) ganha importância para a experiência de laboratório porque a sua chama não emite cor. Esta característica útil ajuda a observar claramente a cor produzida por determinados elementos.

A atividade está dividida em duas partes. A primeira consiste em medir e dissolver cada sal em metanol. Os sais utilizados são:

- Ácido bórico (H_3BO_3) para produzir uma cor verde.
- Hidróxido de potássio (KOH) para produzir um cor-de-rosa.
- Cloreto de cobre (CuCl_2) para produzir uma cor azul, mas primeiramente tem tons verdes.
- Cloreto de lítio (LiCl) para produzir uma cor magenta.
- Bicarbonato de sódio (NaHCO_3) para produzir um cor-de-laranja.

Na segunda parte, a solução enche um recipiente de alumínio e é inflamada.

Como explicamos antes, os elementos que realmente produzem a cor são o Boro, o Potássio, o Cobre, o Lítio e o Sódio devido ao seu espectro de emissão.

Módulo – Efeito de cor luminescente

Caminho de Aprendizagem

Passo 1 (10 minutos) – Os professores iniciam a atividade contando a introdução histórica. Em seguida, faça um breve lembrete sobre as reações de combustão e explique a importância das matérias-primas críticas e sua relação com a pirotecnia (explicada nas informações básicas).

Passo 2 (10 minutos) – Os alunos leem a ‘Introdução’ do Cartão de Estudante.

Cartão do Professor

Passo 3 (5 minutes) – Alunos assistem ao vídeo pirotécnico:

www.youtube.com/watch?v=-0YyhiBy86k

Passo 4 (45 minutes) – Os alunos completam a experiência seguindo o ‘Procedimento de Laboratório’ do Cartão do Aluno.

Passo 5 (10 minutes) – Os alunos respondem às ‘Perguntas’ do Cartão de Estudante (por conta própria ou respondem a um Kahoot).

Passo 6 (10 minutes) – Análise dos resultados e discussão das respostas.



Avaliação

A atividade pode ser avaliada com um relatório de laboratório ou através da qualificação das respostas do aluno às ‘Perguntas’ no Cartão do Estudante ou Kahoot. O link para o Kahoot é:

<https://create.kahoot.it/share/pyrothecnic-s-toolkit/95110f2d-24df-403e-93b6-2bfaf0fea4af>

A segunda opção pode ser feita recolhendo as respostas dos alunos antes de as discutir (isso significa fazer o passo 6 quando o professor já tiver recolhido as respostas, em vez de logo após a experiência), ou pedindo aos alunos que entreguem os seus papéis de resposta a um colega e discutindo as respostas corretas completamente. Dessa forma, cada aluno verificará as respostas de outra pessoa. O professor deve recolher os papéis depois disso para poder anotar as notas.

Descrição dos Cartões de Aluno

Cartão do Aluno – Efeito de cor luminescente

Cartão do Professor

Fontes

- Mundo Geo, 2021, Critical Raw materials in EU, accessed 10 June 2022, https://www.mundo-geo.es/conocimiento/materias-primas-criticas-union-europea_236241_102.html
- Lenntech, 20XX, Strontium – Sr: Chemical properties of strontium - Health effects of strontium - Environmental effects of strontium, accessed 12 June 2002, <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/sr.htm>
- Lenntech, 20XX, Barium – Ba, Chemical properties of barium - Health effects of barium - Environmental effects of barium, accessed 12 June 2002, <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ba.htm>
- Lenntech, 20XX, lithium – Li, Chemical properties of lithium - Health effects of barium - Environmental effects of barium, accessed 12 June 2002, <https://www.lenntech.com/periodic/elements/li.htm>
- MTI Blog, 2011, Aurora Mine, Alhendín-La Malahá, Granada; accessed 12 June 2022 <https://www.mtiblog.com/2011/08/mina-aurora-alhendin-la-malaha-granada.html>
- TFG David León, 2019, Analysis of emissions produced by fireworks, accessed 15 May 2022.
- Química Insólita, 2019, Fireworks with barium | Deflagration of potassium nitrate, sulphur and coal, accessed 10 May 2022, https://www.youtube.com/watch?v=NAMNL_fqOGs
- HROM, 2021, we colour the fire thanks to the emission spectrum, accessed 5 June 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=ngeTcagCvZQ>

Agradecimentos

Este documento foi preparado por: Isabel Ámez, David Bolonio, Blanca Castells, Luis Jesús Fernández, Miguel Izquierdo, David León*, Ljiljana Medic, Christian Peña, Iván González, Jason Casado. School of Mining and Energy Engineering, Universidad Politécnica de Madrid.