

Física y Química para la Innovación

STEAM

Proyectos Experimentales para Transformar el
Conocimiento Científico en Soluciones



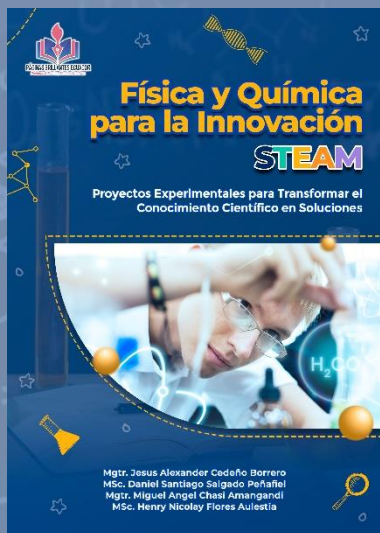
Mgtr. Jesus Alexander Cedeño Borrero
MSc. Daniel Santiago Salgado Peñafiel
Mgtr. Miguel Angel Chasi Amangandi
MSc. Henry Nicolay Flores Aulestia



Física y Química para la Innovación STEAM

*Proyectos experimentales para transformar el
conocimiento científico en soluciones*

2026



Datos bibliográficos:

ISBN:	978-9942-575-64-7
Título del libro:	Física y Química para la Innovación STEAM: Proyectos Experimentales para Transformar el Conocimiento Científico en Soluciones
Autores:	Cedeño Borrero, Jesus Alexander Salgado Peñafiel, Daniel Santiago Chasi Amangandi, Miguel Angel Flores Aulestia, Henry Nicolay
Editorial:	Paginas Brillantes Ecuador
Materia:	Educación
Público objetivo:	Profesional / académico
Publicado:	2026-09-29
Número de edición:	1
Tamaño:	8Mb
Soporte:	Digital
Formato:	Pdf (.pdf)
Idioma:	Español

Datos autores

Mgtr. Cedeño Borrero Jesús Alexander

Código ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8560-2517>

Magíster en Microbiología.

Universidad de Guayaquil - Correo: jesus.cedenob@ug.edu.ec

Ecuador, Guayas, Guayaquil.

MSc. Salgado Peñafiel Daniel Santiago

Código ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9619-9504>

Magíster en Gestión Educativa.

Ministerio de Educación, Deporte y Cultura, Unidad Educativa

Sayausí, Gestión Educativa - Correo:

daniel.salgado@docentes.educacion.edu.ec

Ecuador, Azuay, Cuenca.

Mgtr. Chasi Amangandi Miguel Ángel

Código ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4184-9581>

Magíster en Química Aplicada.

Universidad Estatal de Bolívar - Correo: miguel.chasi@ueb.edu.ec

Ecuador, Bolívar, Guaranda.

MSc. Flores Aulestia Henry Nicolay

Código ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0358-1099>

Magíster.

Ministerio de Educación, Deporte y Cultura, Colegio Técnico San José,

Electromecánica Automotriz - Correo: henrynick25@gmail.com

Ecuador, Pichincha, Quito.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Principios Físico-Químicos para la Creación de Soluciones STEAM	1
1.1. Materia y propiedades vinculadas con su aplicación	2
1.1.1. Composición y estructura de la materia	3
1.1.2. Propiedades físicas relevantes para su utilización	4
1.1.3. Comportamiento químico de las sustancias.....	6
1.1.4. Relación entre estructura, propiedad y función.....	7
1.1.5. Selección de sustancias según necesidades específicas	8
1.2. Interacciones físicas presentes en sistemas materiales	9
1.2.1. Fuerzas y equilibrio en estructuras y objetos.....	10
1.2.2. Presión y comportamiento de fluidos	11
1.2.3. Temperatura y respuesta térmica de los cuerpos.....	12
1.2.4. Electricidad y propiedades conductoras.....	13
1.2.5. Luz y comportamiento óptico de diferentes superficies	16
1.3. Reacciones químicas y posibilidades de aplicación	17
1.3.1. Transformaciones y reorganización de la materia	17
1.3.2. Factores que modifican la velocidad de reacción	18
1.3.3. Procesos de oxidación y reducción	20
1.3.4. Acidez y basicidad en sistemas de interés práctico.....	21
1.3.5. Reacciones químicas asociadas con productos y procesos cotidianos	22
1.4. Relaciones entre materia, energía y transformación.....	23
1.4.1. Transferencia energética en sistemas físicos.....	24
1.4.2. Energía involucrada en procesos químicos	25
1.4.3. Conservación y disipación energética	26
1.4.4. Cambios de estado y transferencia de calor	28
1.4.5. Aprovechamiento de transformaciones energéticas ...	29
1.5. Integración de Física y Química en el enfoque STEAM	30
1.5.1. Articulación de saberes ante problemas complejos	30
1.5.2. Vinculación entre ciencia, tecnología e ingeniería.....	31

1.5.3. Aportes del diseño y la creatividad	32
1.5.4. Razonamiento científico aplicado a situaciones reales	33
1.5.5. Del principio científico a la solución funcional	34
Capítulo 2. Transformaciones de la Materia y la Energía mediante Experiencias STEAM	38
2.1. Cambios de la materia con utilidad práctica	38
2.1.1. Modificaciones físicas reversibles e irreversibles	39
2.1.2. Transformaciones químicas controladas	41
2.1.3. Influencia de las condiciones ambientales	42
2.1.4. Aprovechamiento de cambios de estado	43
2.1.5. Aplicaciones derivadas de las propiedades resultantes	44
2.2. Transferencia y aprovechamiento térmico	46
2.2.1. Conducción en materiales de diferente naturaleza	46
2.2.2. Convección en líquidos y gases	48
2.2.3. Radiación y transferencia de energía	49
2.2.4. Materiales aislantes y conductores	50
2.2.5. Aplicaciones orientadas a la eficiencia térmica	52
2.3. Procesos eléctricos y electroquímicos	53
2.3.1. Movimiento de cargas y conducción eléctrica	53
2.3.2. Comportamiento eléctrico de distintos materiales	54
2.3.3. Conversión entre energía química y eléctrica	55
2.3.4. Celdas electroquímicas y principios de funcionamiento	57
2.3.5. Aplicaciones experimentales de la electroquímica	59
2.4. Separación y recuperación de componentes	60
2.4.1. Características de mezclas y disoluciones	60
2.4.2. Filtración y separación por tamaño de partículas	62
2.4.3. Decantación y diferencias de densidad	63
2.4.4. Destilación y aprovechamiento de puntos de ebullición	64
2.4.5. Recuperación de sustancias mediante procesos combinados	65
2.5. Control de transformaciones para obtener resultados funcionales	67

2.5.1. Condiciones que determinan el comportamiento de un proceso	67
2.5.2. Ajuste de temperatura, presión y concentración	68
2.5.3. Regulación de tiempos y cantidades	70
2.5.4. Identificación de resultados no previstos	71
2.5.5. Modificación del procedimiento para mejorar su desempeño	72
Capítulo 3. Materiales y Procesos Físico-Químicos para la Innovación	76
3.1. Selección científica de materiales	76
3.1.1. Resistencia y comportamiento mecánico	77
3.1.2. Propiedades térmicas según condiciones de uso	79
3.1.3. Conductividad eléctrica y respuesta electromagnética	80
3.1.4. Estabilidad frente a agentes químicos	81
3.1.5. Criterios de elección según función y desempeño	82
3.2. Modificación de propiedades para nuevas aplicaciones....	83
3.2.1. Tratamientos físicos de materiales	84
3.2.2. Modificaciones superficiales mediante procesos químicos	85
3.2.3. Combinación de componentes con propiedades complementarias	86
3.2.4. Protección frente al deterioro	88
3.2.5. Mejora funcional a partir de cambios controlados	89
3.3. Aprovechamiento eficiente de recursos energéticos	91
3.3.1. Conversión entre distintas formas de energía	91
3.3.2. Reducción de pérdidas en sistemas sencillos.....	92
3.3.3. Almacenamiento energético mediante principios físico-químicos	94
3.3.4. Recuperación de energía en procesos cotidianos	95
3.3.5. Criterios de eficiencia aplicados a propuestas STEAM	96
3.4. Recuperación y transformación de recursos	98
3.4.1. Caracterización de materiales descartados.....	98

3.4.2. Separación de componentes aprovechables	99
3.4.3. Transformación de residuos mediante procesos físicos	100
3.4.4. Conversión química para obtener nuevos productos	101
3.4.5. Reincorporación de materiales a nuevos ciclos de uso	102
3.5. Sostenibilidad en procesos de innovación	104
3.5.1. Uso responsable de materias primas	104
3.5.2. Reducción del consumo de agua y energía	105
3.5.3. Prevención y disminución de residuos	106
3.5.4. Durabilidad como criterio de desarrollo.....	107
3.5.5. Equilibrio entre funcionalidad e impacto ambiental ..	108
Capítulo 4. Desarrollo y Optimización de Soluciones Experimentales STEAM	112
4.1. Identificación de problemas susceptibles de intervención	113
4.1.1. Reconocimiento de necesidades del entorno	113
4.1.2. Delimitación del problema desde la Física y la Química	114
4.1.3. Identificación de causas y condiciones relacionadas	115
4.1.4. Establecimiento de requerimientos funcionales	117
4.1.5. Determinación del alcance de la propuesta.....	119
4.2. Formulación de alternativas de solución.....	120
4.2.1. Generación de opciones a partir de principios científicos	120
4.2.2. Comparación de posibles procedimientos	121
4.2.3. Elección de materiales y recursos	122
4.2.4. Valoración inicial de factibilidad.....	123
4.2.5. Selección argumentada de la alternativa	125
4.3. Construcción y puesta a prueba	126
4.3.1. Organización de etapas para la elaboración	126
4.3.2. Preparación de materiales y componentes	128
4.3.3. Construcción de la solución experimental.....	129
4.3.4. Comprobación de su funcionamiento	130
4.3.5. Registro de dificultades y resultados obtenidos	131
4.4. Ajuste y optimización del desempeño	133

4.4.1. Identificación de limitaciones funcionales.....	133
4.4.2. Modificación de condiciones físico-químicas	134
4.4.3. Sustitución o adecuación de materiales	135
4.4.4. Comparación entre versiones de la propuesta.....	136
4.4.5. Determinación de la configuración más eficiente	138
4.5. Valoración integral de la solución desarrollada	140
4.5.1. Funcionamiento frente al problema planteado	140
4.5.2. Eficiencia en el empleo de recursos	141
4.5.3. Seguridad durante su utilización	142
4.5.4. Repercusiones ambientales de su aplicación	144
4.5.5. Posibilidades de adaptación y mejora	145
Capítulo 5. Aplicaciones Físico-Químicas ante Desafíos del Entorno	
.....	148
5.1. Agua y procesos de acondicionamiento.....	148
5.1.1. Propiedades determinantes de la calidad del agua ...	149
5.1.2. Separación de partículas y sustancias no deseadas .	150
5.1.3. Adsorción y materiales con capacidad de retención .	151
5.1.4. Combinación de procedimientos de acondicionamiento	152
5.1.5. Valoración de alternativas según el contexto	154
5.2. Energía y eficiencia en situaciones cotidianas.....	155
5.2.1. Identificación de pérdidas energéticas	156
5.2.2. Conservación térmica mediante materiales accesibles	157
5.2.3. Aprovechamiento de fuentes energéticas disponibles	158
5.2.4. Conversión de energía para usos específicos	159
5.2.5. Mejoras orientadas a un consumo eficiente.....	160
5.3. Materiales y soluciones frente al deterioro.....	161
5.3.1. Procesos responsables de la degradación.....	161
5.3.2. Corrosión y factores que favorecen su aparición	162
5.3.3. Barreras físicas de protección	164
5.3.4. Tratamientos químicos preventivos.....	165
5.3.5. Elección de alternativas según condiciones de exposición	
.....	166

5.4. Residuos como recursos para nuevas aplicaciones	167
5.4.1. Identificación de componentes recuperables	168
5.4.2. Separación y acondicionamiento de materiales.....	169
5.4.3. Transformación para obtener nuevas funciones	170
5.4.4. Comprobación de propiedades del producto resultante	171
5.4.5. Posibilidades de aprovechamiento en el entorno	173
5.5. Casos de Proyectos Experimentales con Enfoque STEAM	174
5.5.1. Sistema de filtración mediante materiales de distinta naturaleza	175
5.5.2. Dispositivo para mejorar la conservación de energía térmica	176
5.5.3. Aplicación electroquímica basada en materiales accesibles	177
5.5.4. Transformación de residuos en un material con nueva utilidad	178
5.5.5. Solución para reducir el deterioro de materiales expuestos al ambiente	179
Bibliografía	182

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Propiedades físicas de los materiales y posibilidades de utilización</i>	5
Tabla 2. <i>Propiedades eléctricas y comportamiento conductor de diferentes materiales</i>	14
Tabla 3. <i>Factores que modifican la velocidad de una reacción química</i>	19
Tabla 4. <i>Diferencias entre modificaciones físicas reversibles e irreversibles</i>	40
Tabla 5. <i>Propiedades resultantes de las transformaciones y sus aplicaciones</i>	45
Tabla 6. <i>Comportamiento térmico de materiales de diferente naturaleza.....</i>	47
Tabla 7. <i>Componentes y funciones de una celda electroquímica</i>	58
Tabla 8. <i>Características de mezclas y disoluciones según su composición.....</i>	61
Tabla 9. <i>Efectos de la temperatura, presión y concentración sobre distintos procesos.....</i>	69
Tabla 10. <i>Propiedades mecánicas relevantes para la selección de materiales</i>	78
Tabla 11. <i>Criterios para seleccionar materiales según función y desempeño</i>	83
Tabla 12. <i>Modificaciones controladas y mejoras funcionales en materiales</i>	90
Tabla 13. <i>Criterios para valorar la eficiencia energética en propuestas STEAM</i>	97
Tabla 14. <i>Criterios para equilibrar funcionalidad e impacto ambiental</i>	109
Tabla 15. <i>Requerimientos funcionales para orientar una solución experimental.....</i>	118
Tabla 16. <i>Criterios para valorar la factibilidad inicial de alternativas</i>	124

Tabla 17. <i>Registro de dificultades, observaciones y resultados experimentales</i>	132
Tabla 18. <i>Comparación de versiones durante la optimización de una propuesta</i>	137
Tabla 19. <i>Criterios de seguridad para la utilización de soluciones experimentales</i>	143
Tabla 20. <i>Propiedades para comprobar la funcionalidad de materiales recuperados</i>	172
Tabla 21. <i>Comparación de los proyectos experimentales STEAM desarrollados</i>	180

Índice de figuras

Figura 1. <i>Relación entre estructura, propiedad y función de los materiales</i>	8
Figura 2. <i>Fuerzas que intervienen en el equilibrio de estructuras y objetos</i>	11
Figura 3. <i>Características de sustancias ácidas, neutras y básicas</i>	22
Figura 4. <i>Formas de conservación, transferencia y disipación de la energía</i>	27
Figura 5. <i>Del principio científico al desarrollo de una solución funcional</i>	35
Figura 6. <i>Características de los materiales aislantes y conductores térmicos</i>	51
Figura 7. <i>Conversión entre energía química y energía eléctrica</i> ...	56
Figura 8. <i>Secuencia combinada para la separación y recuperación de sustancias</i>	66
Figura 9. <i>Etapas para ajustar y mejorar un procedimiento experimental</i>	73
Figura 10. <i>Combinación de componentes con propiedades complementarias</i>	87
Figura 11. <i>Principales fuentes de pérdida energética en sistemas sencillos</i>	93
Figura 12. <i>Ciclo de recuperación, transformación y reincorporación de materiales</i>	103
Figura 13. <i>Organización de causas y condiciones asociadas con un problema</i>	116
Figura 14. <i>Etapas para la construcción y puesta a prueba de una solución</i>	127
Figura 15. <i>Proceso de selección de la configuración con mejor desempeño</i>	139
Figura 16. <i>Integración de procedimientos para el acondicionamiento del agua</i>	153

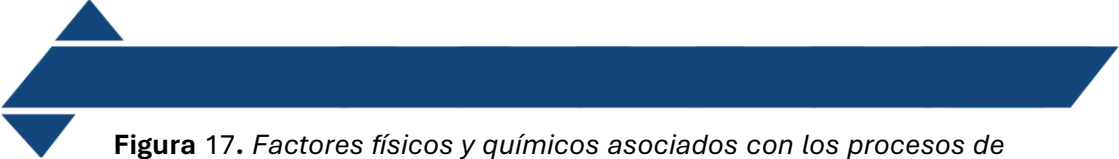


Figura 17. <i>Factores físicos y químicos asociados con los procesos de corrosión</i>	163
--	-----

Introducción

La enseñanza de la Física y la Química enfrenta un desafío persistente: los estudiantes aprenden leyes, fórmulas y modelos que rara vez utilizan para comprender o transformar su entorno. Esta separación entre el conocimiento escolar y los problemas reales debilita la motivación, limita la comprensión profunda y deja sin desarrollar la capacidad de aplicar la ciencia a situaciones concretas. Frente a esta realidad, el enfoque STEAM propone integrar ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemática en torno a problemas auténticos. Su desarrollo ha generado una producción académica creciente en los últimos años (Marín-Marín et al., 2021), junto con un debate todavía abierto sobre sus fundamentos, prioridades y formas de implementación (Belbase et al., 2022).

Dentro de esta integración, la Física y la Química ocupan un lugar central. Aportan los principios que explican por qué un material conduce el calor o la electricidad, cómo se transforma una sustancia, de qué manera se transfiere la energía y por qué los objetos se deterioran con el tiempo. Sin estos principios, la tecnología y la ingeniería se reducen a procedimientos imitados sin comprensión. Con ellos, el estudiante puede anticipar el comportamiento de un dispositivo, justificar sus decisiones de diseño y explicar los resultados que obtiene. Las revisiones recientes sobre educación STEAM en las aulas de ciencias coinciden en destacar el valor de las experiencias que articulan la indagación experimental con el diseño de soluciones (Yulianti et al., 2024).

El propósito de este libro es ofrecer a docentes, estudiantes de formación docente e investigadores en educación científica un recorrido estructurado que conduzca desde los principios físico-químicos hasta el desarrollo de proyectos experimentales con valor

funcional. La obra no se limita a exponer contenidos disciplinares ni a reunir actividades aisladas. Propone un modelo de trabajo en el que cada principio se presenta junto con sus posibilidades de aplicación, cada proceso se vincula con criterios de diseño y medición, y cada proyecto se evalúa por su capacidad de responder a una necesidad real con seguridad, eficiencia y responsabilidad ambiental.

El Capítulo 1 establece los fundamentos de ese recorrido. Examina la materia y sus propiedades, las interacciones físicas presentes en los sistemas materiales, las reacciones químicas con valor aplicado y las relaciones entre materia, energía y transformación. Concluye con la integración de ambas disciplinas en el enfoque STEAM y con la descripción del tránsito desde el principio científico hasta la solución funcional, eje que organiza la obra completa. El Capítulo 2 traslada esos fundamentos a experiencias concretas de transformación: cambios de la materia con utilidad práctica, transferencia y aprovechamiento del calor, procesos eléctricos y electroquímicos, separación de componentes y control de las condiciones que determinan el resultado de un proceso.

El Capítulo 3 aborda los materiales y procesos que sustentan la innovación. Desarrolla la selección científica de materiales según su desempeño mecánico, térmico, eléctrico y químico, las estrategias para modificar sus propiedades, el aprovechamiento eficiente de la energía y la recuperación de recursos a partir de residuos. Incorpora la sostenibilidad como criterio transversal, con apoyo en la perspectiva del ciclo de vida de los materiales (Ashby, 2021) y en los fundamentos de la economía circular (Kirchherr et al., 2023). El Capítulo 4 presenta el proceso de diseño de ingeniería adaptado al trabajo experimental escolar, desde la identificación del problema y la formulación de alternativas hasta la construcción, la optimización y la valoración integral del prototipo (Dieter y Schmidt, 2021).

El Capítulo 5 aplica este recorrido a cuatro desafíos presentes en numerosas comunidades: el acondicionamiento del agua, el uso eficiente de la energía, el deterioro de los materiales expuestos al ambiente y la transformación de residuos en recursos. Su sección final reúne cinco casos de proyectos experimentales que integran los contenidos de la obra. Se trata de un sistema de filtración, un dispositivo de conservación térmica, una pila elaborada con materiales accesibles, un bioplástico obtenido de residuos orgánicos y una estrategia de protección contra la corrosión. Cada caso describe el problema, los principios involucrados, los materiales, el procedimiento y los criterios de evaluación, de modo que pueda adaptarse a contextos educativos diversos.

La obra se construye sobre fuentes académicas verificables, entre ellas manuales de referencia en química, fisicoquímica, ciencia de materiales y termodinámica, revisiones sistemáticas sobre educación STEAM y documentos normativos nacionales e internacionales. Los contenidos se contextualizan en la realidad ecuatoriana. Para ello se consideran la geografía andina y sus condiciones de presión atmosférica y radiación solar, la diversidad de ambientes de costa, sierra y Amazonía, y la disponibilidad de residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz o el bagazo de caña. Esta orientación es coherente con el enfoque interdisciplinario que promueve el currículo nacional vigente (Ministerio de Educación del Ecuador, 2021).

El libro asume además un compromiso explícito con la seguridad y la honestidad científica. Cada propuesta experimental señala sus riesgos, las medidas para controlarlos y los límites de lo que la solución puede lograr. El caso del tratamiento del agua ilustra este compromiso: un filtro escolar constituye solo una etapa dentro de un sistema de barreras múltiples y no reemplaza la desinfección necesaria para

obtener agua apta para el consumo (Organización Mundial de la Salud, 2022). Formar en ciencia implica también formar en responsabilidad, y esa responsabilidad incluye reconocer con claridad lo que un prototipo puede y no puede hacer.

Las tablas y figuras distribuidas a lo largo de los capítulos cumplen una función didáctica precisa. Organizan propiedades, comparan alternativas, representan procesos y ofrecen formatos de registro y evaluación que el lector puede utilizar directamente en su práctica. Cada una se acompaña de un párrafo que explica su sentido y su aplicación. Las propuestas STEAM aspiran a formar personas capaces de analizar los problemas de manera crítica y desde diferentes ángulos (Amanova et al., 2025). Esta obra pretende contribuir a ese propósito mostrando que la Física y la Química, enseñadas desde la experimentación y el diseño, son herramientas para comprender el mundo y para mejorarlo.



CAPÍTULO 1

Principios Físico-Químicos para la Creación de Soluciones STEAM



Capítulo 1. Principios Físico-Químicos para la Creación de Soluciones STEAM

La innovación científica en contextos educativos exige comprender por qué los materiales y las sustancias se comportan como lo hacen antes de proponer cualquier dispositivo o procedimiento. La Física aporta los modelos que describen fuerzas, energía, campos y ondas; la Química explica la composición, el enlace y la transformación de la materia. Cuando ambas disciplinas se articulan con la tecnología, la ingeniería, las artes y la matemática, el estudiante deja de memorizar leyes aisladas y comienza a emplearlas como criterios de decisión frente a problemas concretos, tal como proponen los marcos de educación integrada (Kelley y Knowles, 2016; Belbase et al., 2022).

Este capítulo reúne los principios físico-químicos que sostienen los proyectos experimentales desarrollados en el resto del libro. El recorrido parte de la materia y sus propiedades, examina las interacciones físicas presentes en los sistemas materiales y las reacciones químicas con valor aplicado, y analiza la relación entre materia, energía y transformación. La última sección aborda la integración de ambas disciplinas dentro del enfoque STEAM y describe el tránsito que conduce desde un principio científico hasta una solución funcional verificable en el laboratorio o en el entorno comunitario.

1.1. Materia y propiedades vinculadas con su aplicación

La selección de un material para construir un filtro, un aislante o un electrodo depende de propiedades cuyo origen se encuentra en la escala atómica y molecular. Comprender esa conexión permite anticipar el desempeño de una sustancia antes de ensayarla y reduce el número de pruebas fallidas en un proyecto experimental. Esta sección describe la composición y estructura de la materia, las

propiedades físicas de interés práctico, el comportamiento químico de las sustancias, la relación entre estructura, propiedad y función, y los criterios para seleccionar sustancias de acuerdo con necesidades definidas (Callister y Rethwisch, 2018; Chang y Goldsby, 2016).

1.1.1. Composición y estructura de la materia

Toda la materia está constituida por átomos de algo más de un centenar de elementos que se combinan mediante enlaces químicos para formar moléculas, redes iónicas, redes covalentes y estructuras metálicas. El modelo atómico actual describe un núcleo con protones y neutrones rodeado de electrones distribuidos en orbitales, cuya configuración determina la reactividad y el tipo de enlace que un elemento tiende a formar. La tabla periódica organiza esa información de manera predictiva, pues la posición de un elemento permite estimar su electronegatividad, su radio atómico y su tendencia a ganar o perder electrones (Chang y Goldsby, 2016).

El tipo de enlace condiciona la organización de las partículas a mayor escala. En los metales, los electrones de valencia se deslocalizan y forman una nube compartida que explica la conductividad y la maleabilidad; en los compuestos iónicos, la atracción electrostática genera redes cristalinas rígidas con puntos de fusión elevados; en los sólidos covalentes, como el diamante o el cuarzo, los enlaces direccionales producen estructuras de gran dureza. Los polímeros están formados por cadenas largas cuya disposición, lineal, ramificada o entrecruzada, modifica su flexibilidad, su cristalinidad y su resistencia térmica (Callister y Rethwisch, 2018).

Para el trabajo didáctico resulta útil distinguir tres niveles de representación: el macroscópico, que corresponde a lo observable; el submicroscópico, referido a átomos, iones y moléculas; y el simbólico, que emplea fórmulas y ecuaciones. Johnstone (1991) advirtió que buena parte de la dificultad para aprender química proviene de exigir al

estudiante que transite entre estos niveles sin apoyo explícito, y Talanquer (2011) amplió esa idea al mostrar que cada nivel admite múltiples dimensiones de interpretación. Un proyecto STEAM bien diseñado obliga a vincular aquello que se observa con el modelo que lo explica.

1.1.2. Propiedades físicas relevantes para su utilización

Las propiedades físicas son aquellas que pueden medirse sin alterar la identidad química de la sustancia. Entre las más utilizadas para decidir el uso de un material figuran la densidad, la dureza, la resistencia mecánica, la conductividad térmica, la conductividad eléctrica, el punto de fusión, la solubilidad y el comportamiento óptico. Algunas son intensivas, porque no dependen de la cantidad de muestra, y sirven para identificar sustancias; otras son extensivas, como la masa o el volumen, y resultan útiles para dimensionar un prototipo o calcular la cantidad de materia prima necesaria (Chang y Goldsby, 2016).

La densidad determina si un material flota, cómo se distribuye en una mezcla y cuánto pesa una pieza de volumen dado, por lo que orienta desde el diseño de embarcaciones hasta la separación de residuos por decantación. La dureza y la tenacidad informan sobre la capacidad de resistir rayado e impacto, mientras que el módulo de elasticidad indica cuánto se deforma un material bajo carga. En los proyectos térmicos, la conductividad y la capacidad calorífica específica deciden si una sustancia conviene como aislante o como medio de almacenamiento de calor (Callister y Rethwisch, 2018).

Estas propiedades no deben considerarse de forma aislada. Un envase para conservar alimentos calientes requiere baja conductividad térmica, pero también resistencia a la humedad, estabilidad a la temperatura de uso y un costo compatible con el contexto. Ashby (2011) propuso representar varias propiedades en mapas comparativos para identificar familias de materiales que satisfacen al

mismo tiempo varios requisitos, estrategia que puede adaptarse al aula mediante tablas de doble entrada. La Tabla 1 resume las propiedades físicas más relevantes y las aplicaciones que se derivan de ellas.

Tabla 1. *Propiedades físicas de los materiales y posibilidades de utilización*

Propiedad física	Qué indica	Posibilidades de utilización
Densidad	Masa por unidad de volumen	Flotación, separación por decantación, diseño de piezas livianas
Dureza	Resistencia al rayado y a la penetración	Superficies de trabajo, herramientas de corte, recubrimientos
Resistencia a la tracción	Esfuerzo máximo que soporta antes de romperse	Cables, estructuras tensadas, fibras de refuerzo
Conductividad térmica	Facilidad para transmitir calor	Aislantes, disipadores, recipientes de cocción
Conductividad eléctrica	Facilidad para permitir el paso de corriente	Conductores, electrodos, aislantes eléctricos
Punto de fusión	Temperatura de paso de sólido a líquido	Moldeo, soldadura, materiales para altas temperaturas
Solubilidad	Cantidad de sustancia que se disuelve en un disolvente	Preparación de disoluciones, extracción, limpieza
Transparencia	Proporción de luz visible transmitida	Ventanas, colectores solares, envases de observación

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2018) y Ashby (2011).

La tabla muestra que cada propiedad física responde a una pregunta de diseño distinta. La densidad y la resistencia a la tracción se relacionan con el peso y la integridad estructural de un objeto; la conductividad térmica y la eléctrica definen cómo interactúa el material con la energía; el punto de fusión y la solubilidad condicionan los procesos de fabricación y limpieza. Para el estudiante, esta organización convierte datos que suelen aparecer como valores memorizados en criterios

operativos aplicables al elegir un material para un prototipo, y facilita la justificación escrita de esa elección en el informe del proyecto.

1.1.3. Comportamiento químico de las sustancias

Las propiedades químicas describen la capacidad de una sustancia para transformarse en otra al interactuar con agentes como el oxígeno, el agua, los ácidos o la luz. La inflamabilidad, la tendencia a oxidarse, la reactividad frente a ácidos y bases, la estabilidad térmica y la toxicidad son ejemplos de propiedades que solo se manifiestan cuando ocurre, o podría ocurrir, un cambio de composición. Su conocimiento es imprescindible tanto para aprovechar reacciones útiles como para evitar transformaciones indeseadas en un dispositivo experimental o durante su almacenamiento (Chang y Goldsby, 2016).

La reactividad de un elemento se relaciona con su configuración electrónica. Los metales alcalinos, con un solo electrón de valencia, reaccionan vigorosamente con el agua, mientras que los gases nobles, con capas completas, son prácticamente inertes en condiciones ordinarias. En los compuestos orgánicos, los grupos funcionales determinan el comportamiento: alcoholes, ácidos carboxílicos y aminas reaccionan de forma característica, lo que permite predecir interacciones entre materiales. La serie de actividad de los metales anticipa cuál se corroerá primero cuando dos metales distintos entran en contacto en presencia de un electrolito (Chang y Goldsby, 2016).

En los proyectos experimentales, el comportamiento químico define compatibilidades y riesgos. Un recipiente de aluminio no es adecuado para almacenar disoluciones ácidas o básicas concentradas, un filtro de carbón activado pierde eficacia cuando se satura de compuestos orgánicos y ciertos plásticos se degradan en contacto con disolventes comunes. Considerar estas interacciones desde la fase de diseño permite seleccionar combinaciones seguras y duraderas, y enlaza el trabajo experimental con los principios de la química verde, que

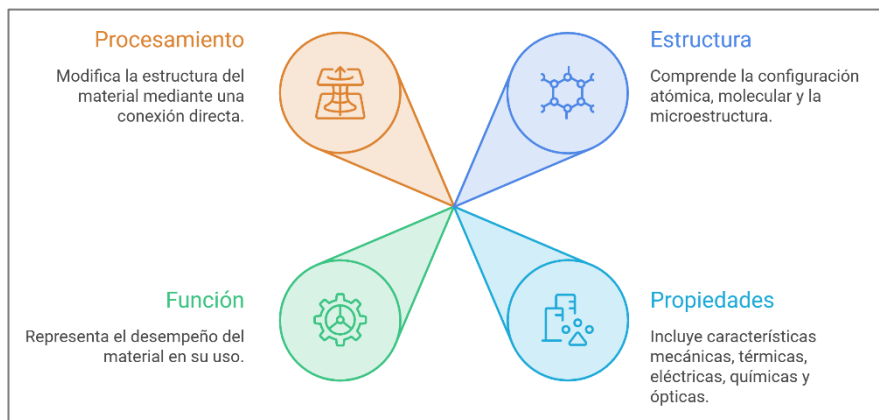
priorizan sustancias menos peligrosas y procesos con menor generación de residuos (Anastas y Warner, 1998).

1.1.4. Relación entre estructura, propiedad y función

La ciencia de materiales organiza su conocimiento en torno a una relación causal: la estructura, en sus distintas escalas, determina las propiedades, y estas condicionan la función que el material puede cumplir. A esa secuencia se añade el procesamiento, porque la forma en que un material se fabrica o se trata modifica su estructura interna. Callister y Rethwisch (2018) describen esta relación como el núcleo del diseño de materiales, dado que permite intervenir sobre la estructura para obtener un desempeño deseado en lugar de limitarse a aceptar las propiedades de origen.

Los ejemplos son abundantes. El carbono se presenta como grafito, con capas que se deslizan entre sí y conducen la electricidad, o como diamante, con una red tridimensional de enlaces covalentes que lo vuelve extremadamente duro y aislante. El acero templado, enfriado bruscamente, adquiere mayor dureza que el recocido porque su microestructura cambia. En los polímeros, el entrecruzamiento de cadenas transforma un material blando y termoplástico en otro rígido y resistente al calor, como sucede en la vulcanización del caucho, proceso que modificó por completo la utilidad industrial de este material.

Para la enseñanza, esta relación ofrece un marco explicativo que conecta la química con la ingeniería. Cuando el estudiante se pregunta por qué una fibra natural absorbe agua o por qué un metal se dobla sin romperse, razona desde la estructura hacia la función y construye explicaciones con poder predictivo. La Figura 1 representa esta secuencia y sirve como herramienta para planificar cualquier proyecto que requiera elegir, comparar o modificar un material, además de orientar la redacción de hipótesis sobre su comportamiento esperado.

Figura 1. Relación entre estructura, propiedad y función de los materiales

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2018).

La figura resume una lógica que atraviesa todo el libro. La estructura, desde la disposición de los átomos hasta la organización de granos y fibras, fija el conjunto de propiedades posibles; esas propiedades definen qué funciones puede desempeñar el material; y el procesamiento actúa como palanca para modificar la estructura cuando la función requerida no se alcanza. Leída en sentido inverso, la figura orienta el diseño: se parte de la función que se necesita, se identifican las propiedades exigidas y se busca la estructura, natural o modificada, capaz de proporcionarlas con el menor costo y riesgo.

1.1.5. Selección de sustancias según necesidades específicas

Seleccionar una sustancia implica traducir una necesidad en requisitos medibles. Si el objetivo es retener partículas en suspensión, se requieren materiales porosos con tamaño de poro controlado; si se busca conservar calor, se necesitan sustancias de baja conductividad térmica; si se desea generar corriente mediante una reacción, se precisan pares de metales con potenciales de reducción suficientemente distintos. Este procedimiento transforma una

intención general en una lista de especificaciones que puede contrastarse con datos experimentales o bibliográficos antes de adquirir o preparar los materiales (Ashby, 2011).

A los criterios técnicos se suman otros de carácter práctico y ético: disponibilidad local, costo, seguridad de manipulación, posibilidad de reutilización y efecto ambiental de la disposición final. En contextos escolares ecuatorianos, materiales como la arena de río, el carbón vegetal, la cascarilla de arroz, las botellas de tereftalato de polietileno o el cobre recuperado de cables en desuso suelen reunir condiciones adecuadas de acceso y bajo riesgo. El currículo nacional de Ciencias Naturales orienta el aprendizaje hacia la indagación y la relación con el entorno, lo que respalda el uso de estos recursos (Ministerio de Educación del Ecuador, 2016).

La selección debe documentarse con argumentos. Una matriz que pondere cada requisito y compare varias sustancias permite al estudiante justificar su decisión y revisarla si los ensayos no confirman lo previsto, dejando constancia de los criterios que resultaron decisivos. Este ejercicio desarrolla al mismo tiempo razonamiento científico y habilidades propias de la ingeniería, porque exige combinar conocimiento conceptual con restricciones reales de recursos, tiempo y seguridad, condición que la literatura sobre educación STEM integrada considera central para un aprendizaje con sentido (Kelley y Knowles, 2016).

1.2. Interacciones físicas presentes en sistemas materiales

Los sistemas materiales que se construyen en un proyecto experimental están sometidos a fuerzas, presiones, variaciones de temperatura, campos eléctricos y radiación luminosa. Estas interacciones determinan si una estructura se mantiene en pie, si un fluido circula por un conducto, si un recipiente conserva el calor o si una superficie refleja o absorbe la luz. La sección aborda cinco

interacciones físicas fundamentales y su relevancia para el diseño de soluciones, con apoyo en los modelos de la mecánica, la termodinámica, el electromagnetismo y la óptica (Serway y Jewett, 2018; Hewitt, 2015).

1.2.1. Fuerzas y equilibrio en estructuras y objetos

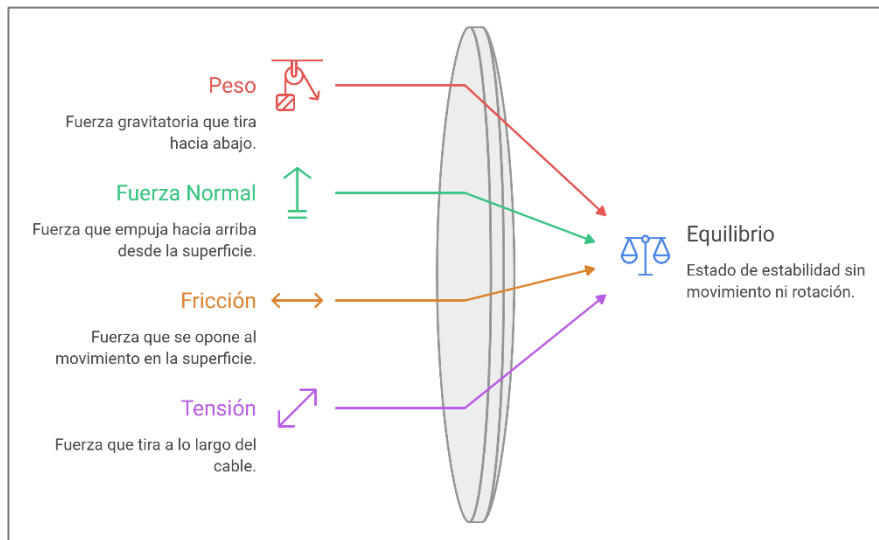
Una fuerza es una interacción capaz de modificar el estado de movimiento o la forma de un cuerpo. En la vida cotidiana y en los prototipos escolares intervienen principalmente el peso, la fuerza normal, la tensión, la fricción y las fuerzas elásticas. La segunda ley de Newton relaciona la fuerza neta con la aceleración, y de ella se desprende que un cuerpo en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme soporta una fuerza neta nula. Esta condición de equilibrio de traslación constituye el punto de partida para analizar cualquier estructura que deba sostenerse sin desplazarse (Serway y Jewett, 2018).

El equilibrio completo exige además que la suma de los momentos de fuerza respecto de cualquier punto sea cero, de modo que el cuerpo no gire. Esta segunda condición explica por qué una repisa necesita soportes bien ubicados, por qué una grúa lleva contrapeso y por qué el centro de gravedad debe caer dentro de la base de apoyo para que un objeto no se vuelque. Los triángulos, al ser figuras indeformables, distribuyen las cargas en tracción y compresión, razón por la cual aparecen en puentes, torres y armaduras de techos (Hewitt, 2015).

Los proyectos de construcción con materiales ligeros, como puentes de palillos, torres de papel o soportes para sensores, permiten verificar estas condiciones de forma directa. El estudiante puede medir la carga máxima, identificar el elemento que falla primero y relacionar la falla con una propiedad mecánica del material o con una distribución deficiente de las fuerzas. La Figura 2 presenta las fuerzas que intervienen en el equilibrio de estructuras y objetos, y sirve como guía

para elaborar diagramas de cuerpo libre antes de iniciar la construcción.

Figura 2. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de estructuras y objetos



Nota. Elaborada a partir de Serway y Jewett (2018).

La figura integra las fuerzas más frecuentes en los sistemas estáticos y las dos condiciones que garantizan el equilibrio. El peso actúa desde el centro de gravedad; la normal y la fricción surgen en las superficies de contacto; la tensión aparece en cables y cuerdas. Al representar estas fuerzas como vectores, el estudiante puede verificar si su suma se anula y si los momentos respecto de un eje se compensan. Este análisis previo permite anticipar puntos críticos, dimensionar elementos y justificar decisiones de diseño con cálculos sencillos antes de invertir materiales en la construcción.

1.2.2. Presión y comportamiento de fluidos

La presión es la fuerza por unidad de área, y su unidad en el Sistema Internacional es el pascal. En los fluidos en reposo, la presión aumenta

con la profundidad según el producto de la densidad, la aceleración de la gravedad y la altura de la columna, lo que explica por qué los muros de una represa son más gruesos en la base. El principio de Pascal establece que una variación de presión aplicada a un fluido confinado se transmite íntegramente a todos sus puntos, fundamento de prensas y frenos hidráulicos (Serway y Jewett, 2018).

El principio de Arquímedes indica que un cuerpo sumergido experimenta un empuje igual al peso del fluido desalojado, y la comparación entre ese empuje y el peso del cuerpo determina si flota o se hunde. En los fluidos en movimiento, la ecuación de continuidad señala que el caudal se conserva, de manera que el fluido se acelera al atravesar una sección más estrecha, y la ecuación de Bernoulli relaciona presión, velocidad y altura. Estos principios explican el funcionamiento de atomizadores, sifones y la sustentación de un ala (Hewitt, 2015).

En Quito y en otras ciudades andinas, la presión atmosférica es notablemente menor que al nivel del mar, lo que reduce la temperatura de ebullición del agua y afecta los procesos de cocción y destilación. Este rasgo del contexto ofrece una oportunidad didáctica valiosa: los estudiantes pueden medir la temperatura de ebullición local, compararla con la de referencia y explicar la diferencia a partir de la relación entre presión de vapor y presión externa. Los filtros por gravedad, los sistemas de riego por goteo y los cohetes de agua son proyectos en los que la presión resulta determinante.

1.2.3. Temperatura y respuesta térmica de los cuerpos

La temperatura es una medida de la energía cinética media de las partículas que componen un cuerpo, mientras que el calor es la energía transferida entre sistemas a causa de una diferencia de temperatura. Confundir ambos conceptos es una dificultad persistente en el aprendizaje de la física, por lo que conviene distinguirlos desde el inicio

de cualquier proyecto térmico. La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una sustancia depende de su masa y de su capacidad calorífica específica; el agua, con un valor elevado, amortigua los cambios térmicos (Serway y Jewett, 2018).

Casi todos los materiales se dilatan al calentarse, porque el aumento de la agitación de las partículas incrementa la distancia media entre ellas. La dilatación lineal es proporcional a la longitud inicial, al coeficiente de dilatación del material y a la variación de temperatura. Este fenómeno obliga a dejar juntas en rieles, puentes y pavimentos, y se aprovecha en los termostatos bimetálicos, donde dos metales con coeficientes distintos se curvan al calentarse. El agua presenta un comportamiento anómalo entre 0 y 4 °C, intervalo en el que se contrae al aumentar su temperatura (Hewitt, 2015).

La respuesta térmica incluye también cambios en otras propiedades. La resistencia eléctrica de los metales aumenta con la temperatura, la viscosidad de los líquidos disminuye y muchos polímeros se ablandan al superar su temperatura de transición vítrea. En los proyectos experimentales, estas variaciones pueden constituir un problema, como la deformación de un envase plástico que contiene líquidos calientes, o una oportunidad, como el uso de la variación de resistencia para construir un sensor de temperatura. Registrar la temperatura durante los ensayos resulta indispensable para interpretar correctamente los resultados.

1.2.4. Electricidad y propiedades conductoras

La corriente eléctrica es el flujo de carga a través de un material y requiere portadores móviles, como los electrones libres en los metales o los iones en las disoluciones electrolíticas. La ley de Ohm establece que, para muchos conductores, la intensidad de corriente es proporcional a la diferencia de potencial aplicada, con una constante de proporcionalidad denominada resistencia. Esta depende de la

resistividad del material, de su longitud y de su sección transversal, lo que explica por qué los cables largos y delgados disipan más energía que los cortos y gruesos (Serway y Jewett, 2018).

Según su resistividad, los materiales se clasifican en conductores, semiconductores y aislantes. La teoría de bandas explica esta diferencia: en los conductores, la banda de valencia y la de conducción se superponen o están parcialmente ocupadas; en los aislantes, una brecha energética amplia impide el paso de electrones; y en los semiconductores, como el silicio, esa brecha es pequeña y la conductividad puede modificarse con la temperatura o mediante dopaje con impurezas. En las disoluciones, la conductividad depende de la concentración y de la movilidad de los iones presentes (Callister y Rethwisch, 2018).

Estas diferencias tienen consecuencias directas en el diseño. El cobre se emplea en el cableado por su alta conductividad y ductilidad, el aluminio en líneas de transmisión por su menor densidad, y los polímeros y cerámicos como aislantes. En proyectos escolares, la medición de la conductividad de disoluciones de sal, azúcar o vinagre permite distinguir electrolitos de no electrolitos y relacionar la química de las sustancias con su comportamiento eléctrico. La Tabla 2 sintetiza las propiedades eléctricas de materiales frecuentes en el trabajo experimental.

Tabla 2. *Propiedades eléctricas y comportamiento conductor de diferentes materiales*

Material	Tipo	Comportamiento eléctrico	Uso experimental
Cobre	Conductor metálico	Resistividad muy baja por electrones libres	Cables, electrodos, circuitos
Aluminio	Conductor metálico	Buena conductividad con baja densidad	Conductores livianos, electrodos en celdas sencillas

Material	Tipo	Comportamiento eléctrico	Uso experimental
Grafito	Conductor no metálico	Conduce a lo largo de sus capas	Electrodos, resistencias de mina de lápiz
Silicio	Semiconductor	Conductividad variable con temperatura y dopaje	Diodos, celdas fotovoltaicas, sensores
Agua con sal	Electrolito	Conducción iónica creciente con la concentración	Celdas electrolíticas, pruebas de conductividad
Agua destilada	Conductor muy débil	Escasez de iones disueltos	Control en ensayos de conductividad
Vidrio	Aislante	Resistividad muy alta	Soportes, recipientes
Polietileno	Aislante	Ausencia de portadores móviles	Recubrimiento y aislamiento de cables

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2018) y Chang y Goldsby (2016).

La tabla evidencia que la conducción eléctrica puede producirse por mecanismos diferentes. En los metales y el grafito, la corriente se debe al movimiento de electrones; en las disoluciones salinas, al desplazamiento de iones hacia los electrodos; en los semiconductores, a la contribución de electrones y huecos cuya concentración puede controlarse. Esta distinción es clave para los proyectos electroquímicos del Capítulo 2, porque una celda requiere al mismo tiempo conducción electrónica en el circuito externo y conducción iónica en el electrolito. El agua destilada funciona como referencia para demostrar que la conductividad del agua común proviene de las sales disueltas.

1.2.5. Luz y comportamiento óptico de diferentes superficies

La luz es una onda electromagnética que, al incidir sobre una superficie, puede reflejarse, transmitirse, absorberse o dispersarse. La proporción de cada fenómeno depende de la naturaleza del material, de su textura superficial y de la longitud de onda incidente. Las superficies lisas y metálicas producen reflexión especular, mientras que las rugosas generan reflexión difusa; los materiales transparentes transmiten la mayor parte de la luz visible y los opacos la absorben o la reflejan. Estas diferencias explican el color, el brillo y la apariencia de los objetos (Hewitt, 2015).

Cuando la luz pasa de un medio a otro con distinto índice de refracción, cambia su velocidad y se desvía, fenómeno descrito por la ley de Snell. La refracción explica el funcionamiento de lentes y prismas, y la reflexión interna total permite guiar la luz en las fibras ópticas. La absorción, por su parte, convierte la energía luminosa en energía térmica, y su magnitud aumenta en superficies oscuras y mates. Por esta razón, los colectores solares se recubren de negro mate y los techos de colores claros permanecen más frescos bajo radiación intensa (Serway y Jewett, 2018).

Los proyectos que aprovechan la radiación solar, como cocinas solares, deshidratadores de alimentos o destiladores de agua, dependen de combinar superficies reflectantes que concentren la luz, cubiertas transparentes que la dejen pasar y superficies absorbentes que la conviertan en calor. En la región andina ecuatoriana, próxima a la línea equinoccial y situada a gran altitud, la radiación solar es intensa durante gran parte del año, lo que otorga a estos dispositivos un sentido práctico. Medir la temperatura alcanzada con distintas superficies permite cuantificar la influencia del comportamiento óptico en el desempeño.

1.3. Reacciones químicas y posibilidades de aplicación

Las reacciones químicas constituyen el mecanismo por el cual se obtienen nuevos materiales, se libera o almacena energía y se transforman residuos en productos útiles. Su comprensión exige conocer cómo se reorganizan los átomos, qué factores controlan la rapidez con que ocurren, cómo se transfieren electrones y cómo se comportan los ácidos y las bases. Esta sección examina estos aspectos desde una perspectiva aplicada, vinculando cada tipo de reacción con procesos cotidianos y con las posibilidades que ofrece para el diseño de proyectos experimentales en el aula y en la comunidad (Chang y Goldsby, 2016; Atkins et al., 2018).

1.3.1. Transformaciones y reorganización de la materia

Una reacción química implica la ruptura de enlaces en los reactivos y la formación de enlaces nuevos en los productos, con la consecuente aparición de sustancias de propiedades distintas. Los átomos no se crean ni se destruyen, sino que se reorganizan, principio formulado por Lavoisier como ley de conservación de la masa y expresado en el balanceo de las ecuaciones químicas. Los indicios observables de una reacción incluyen cambios de color, desprendimiento de gas, formación de precipitados, emisión de luz y variaciones de temperatura, aunque ninguno de ellos la confirma por sí solo (Chang y Goldsby, 2016).

Las reacciones se clasifican según el patrón de reorganización: síntesis, cuando dos o más sustancias forman una sola; descomposición, cuando un compuesto se separa en otros más simples; desplazamiento simple, cuando un elemento sustituye a otro en un compuesto; doble desplazamiento, cuando dos compuestos intercambian iones; y combustión, cuando una sustancia reacciona con oxígeno liberando energía. Esta clasificación, aunque simplificada, permite anticipar productos y seleccionar reacciones apropiadas para

obtener un material, precipitar un contaminante o generar un gas de interés (Chang y Goldsby, 2016).

La estequiometría aporta el componente cuantitativo. A partir de la ecuación balanceada es posible calcular las masas de reactivos necesarias, identificar el reactivo limitante y estimar el rendimiento teórico. En un proyecto experimental, comparar el rendimiento obtenido con el teórico permite detectar pérdidas, reacciones secundarias o errores de medición. Talanquer (2011) subraya que la comprensión profunda de una reacción requiere articular la observación macroscópica con la interpretación submicroscópica y la representación simbólica, de modo que cada ensayo se convierte en un ejercicio de modelización y no en la simple ejecución de un procedimiento.

1.3.2. Factores que modifican la velocidad de reacción

La cinética química estudia la rapidez con que los reactivos se transforman en productos. Según la teoría de colisiones, una reacción ocurre cuando las partículas chocan con energía suficiente para superar la energía de activación y con una orientación adecuada. Cualquier factor que incremente la frecuencia o la eficacia de esos choques acelera el proceso. Controlar la velocidad resulta tan importante como conocer los productos, porque una reacción demasiado lenta puede carecer de utilidad práctica y una demasiado rápida puede resultar peligrosa o difícil de controlar (Atkins et al., 2018).

Los factores principales son la concentración de los reactivos, la temperatura, el área superficial de los sólidos, la presencia de catalizadores y, en las reacciones entre gases, la presión. Un aumento de temperatura eleva la fracción de moléculas con energía superior a la de activación, relación que la ecuación de Arrhenius expresa de forma exponencial. Los catalizadores ofrecen un mecanismo alternativo con menor energía de activación sin consumirse en el proceso, y las

enzimas cumplen esta función en los sistemas biológicos con una especificidad notable (Chang y Goldsby, 2016).

En la vida cotidiana, estos factores se manejan de forma intuitiva: los alimentos se refrigeran para retrasar su descomposición, la leña se corta en astillas para encender el fuego y las tabletas efervescentes se disuelven más rápido en agua tibia. En el laboratorio escolar, la reacción entre bicarbonato de sodio y vinagre, o la de una tableta antiácida en agua, permite medir el tiempo de reacción mientras se modifica una sola condición. La Tabla 3 organiza estos factores y sus efectos con ejemplos reproducibles mediante materiales de bajo costo.

Tabla 3. Factores que modifican la velocidad de una reacción química

Factor	Efecto	Explicación	Ejemplo reproducible
Concentración	Aumenta la velocidad al incrementarse	Más partículas por unidad de volumen y más colisiones	Vinagre puro frente a diluido con bicarbonato
Temperatura	Aumenta la velocidad al elevarse	Mayor fracción de colisiones con energía suficiente	Tableta efervescente en agua fría y tibia
Área superficial	Aumenta al subdividir el sólido	Mayor superficie expuesta al contacto	Tableta entera frente a tableta triturada
Catalizador	Aumenta sin consumirse	Disminuye la energía de activación	Descomposición del peróxido de hidrógeno con levadura
Presión en gases	Aumenta al elevarse	Mayor concentración de moléculas gaseosas	Síntesis industrial de amoníaco
Inhibidor	Disminuye la velocidad	Interfiere con el mecanismo de reacción	Antioxidantes en alimentos envasados

Nota. Elaborada a partir de Atkins et al. (2018) y Chang y Goldsby (2016).

La tabla muestra que todos los factores actúan sobre un mismo mecanismo, la frecuencia y la eficacia de las colisiones entre partículas, aunque lo hagan por vías diferentes. Esta unidad explicativa ayuda al estudiante a no memorizar reglas aisladas y a razonar ante situaciones nuevas. Los ejemplos propuestos permiten diseñar experimentos controlados en los que se modifica una variable mientras las demás permanecen constantes, competencia básica de la indagación científica. La inclusión del inhibidor recuerda que en muchas aplicaciones, como la conservación de alimentos o la protección de metales, el objetivo consiste en retardar una reacción indeseada.

1.3.3. Procesos de oxidación y reducción

Las reacciones de oxidación y reducción, conocidas como redox, implican transferencia de electrones entre especies químicas. La oxidación corresponde a la pérdida de electrones y la reducción a su ganancia; ambas ocurren siempre de forma simultánea, porque los electrones que libera una especie son captados por otra. El número de oxidación es una herramienta contable que permite identificar qué elementos se oxidan y cuáles se reducen, así como balancear ecuaciones complejas mediante el método de las semirreacciones, especialmente útil en medios ácidos o básicos (Chang y Goldsby, 2016).

Los procesos redox están presentes en la combustión, la respiración celular, la fotosíntesis, la corrosión de metales, el blanqueo de textiles y el funcionamiento de pilas y baterías. La tendencia de una especie a reducirse se cuantifica mediante el potencial estándar de reducción, y la diferencia entre los potenciales de dos semirreacciones determina el voltaje que puede generar una celda galvánica. Esta relación permite predecir si una reacción será espontánea en condiciones estándar y estimar cuánta energía eléctrica podría obtenerse de ella (Atkins et al., 2018).

En los proyectos experimentales, los procesos redox ofrecen aplicaciones muy variadas. Una pila construida con electrodos de cobre y zinc insertados en limones o sumergidos en disolución salina permite medir voltajes y relacionarlos con la serie electroquímica. La electrólisis del agua ilustra el proceso inverso, en el que la energía eléctrica provoca una reacción no espontánea. El estudio de la corrosión del hierro en diferentes condiciones de humedad y salinidad, por su parte, anticipa los proyectos de protección de materiales que se desarrollan en el Capítulo 5.

1.3.4. Acidez y basicidad en sistemas de interés práctico

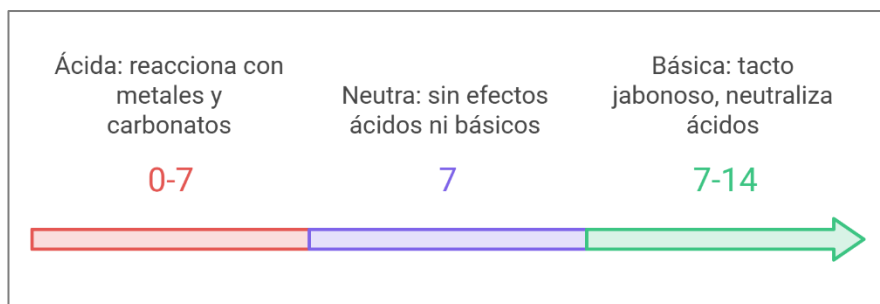
Según el modelo de Brønsted y Lowry, un ácido es una sustancia que dona protones y una base es la que los acepta. En disolución acuosa, la acidez se expresa mediante la escala de pH, definida como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio. A 25 °C, un pH menor que 7 indica un medio ácido, igual a 7 un medio neutro y mayor que 7 un medio básico. Por tratarse de una escala logarítmica, cada unidad representa un cambio de diez veces en la concentración de iones hidronio (Chang y Goldsby, 2016).

Los ácidos y las bases fuertes se disocian completamente en agua, mientras que los débiles lo hacen de manera parcial y establecen un equilibrio. Esta diferencia explica que el vinagre, que contiene ácido acético, sea mucho menos corrosivo que una disolución de ácido clorhídrico de igual concentración. La neutralización entre un ácido y una base produce una sal y agua, y sustenta procesos como el alivio de la acidez estomacal, la corrección de suelos ácidos con cal agrícola o el ajuste del pH de efluentes antes de su descarga (Atkins et al., 2018).

Los indicadores ácido-base cambian de color según el pH y permiten estimarlo sin instrumentos. Además de los indicadores comerciales, extractos vegetales como el de col morada contienen antocianinas que viran del rojo en medio ácido al verde o amarillo en medio básico, lo que

facilita experiencias de bajo costo y alto valor explicativo. La Figura 3 presenta las características de las sustancias ácidas, neutras y básicas, con ejemplos cotidianos que ayudan a situar productos de uso doméstico en la escala de pH.

Figura 3. Características de sustancias ácidas, neutras y básicas



Nota. Elaborada a partir de Chang y Goldsby (2016).

La figura organiza las sustancias según su posición en la escala de pH y asocia cada región con propiedades observables: reacción con ciertos metales y con carbonatos en los ácidos, tacto jabonoso y capacidad de neutralizar ácidos en las bases, y ausencia de estos efectos en las sustancias neutras. Ubicar productos domésticos en la escala permite al estudiante relacionar el concepto con su experiencia y comprender por qué ciertos limpiadores no deben mezclarse. Esta información resulta necesaria en los proyectos de acondicionamiento de agua y de tratamiento de residuos, donde el pH condiciona la eficacia de muchos procesos.

1.3.5. Reacciones químicas asociadas con productos y procesos cotidianos

Numerosos procesos de la vida diaria son reacciones químicas que pasan inadvertidas. La cocción de alimentos involucra la reacción de Maillard entre azúcares y aminoácidos, responsable del dorado y del aroma del pan tostado; la fermentación transforma azúcares en etanol

y dióxido de carbono en la elaboración de pan y bebidas; la saponificación de grasas con una base fuerte produce jabón. Reconocer la química presente en estos procesos acerca la disciplina a la experiencia del estudiante y ofrece puntos de partida para proyectos contextualizados en la cultura local (Chang y Goldsby, 2016).

En el ámbito doméstico y comunitario son frecuentes también la combustión en cocinas y motores, la oxidación enzimática que oscurece las frutas cortadas, la acción de los blanqueadores basados en hipoclorito y la desinfección del agua con cloro. En la construcción, el fraguado del cemento y del yeso consiste en reacciones de hidratación que generan estructuras sólidas y resistentes. Cada uno de estos procesos puede analizarse en términos de reactivos, productos, condiciones y energía involucrada, lo que permite trasladar conceptos teóricos a situaciones con significado para la comunidad educativa.

El análisis de estos procesos incorpora además una dimensión de responsabilidad. La mezcla de lejía con productos amoniacales o ácidos libera gases tóxicos, la combustión incompleta produce monóxido de carbono y el vertido de detergentes altera los ecosistemas acuáticos. Los principios de la química verde proponen diseñar productos y procesos que reduzcan o eliminen el uso y la generación de sustancias peligrosas (Anastas y Warner, 1998). Incorporar esta mirada a los proyectos STEAM orienta la innovación hacia soluciones seguras, económicas y ambientalmente responsables.

1.4. Relaciones entre materia, energía y transformación

Toda transformación física o química implica intercambios de energía. Un proyecto que busca conservar calor, generar electricidad o aprovechar la radiación solar requiere comprender cómo se transfiere la energía, cuánta se absorbe o libera en un proceso químico, por qué una parte se disipa y cómo pueden aprovecharse los cambios de estado. Esta sección presenta los fundamentos termodinámicos que

sustentan el análisis energético de las soluciones experimentales, con especial atención a los principios de conservación y a los criterios de eficiencia (Atkins et al., 2018; Serway y Jewett, 2018).

1.4.1. Transferencia energética en sistemas físicos

La energía se transfiere entre sistemas principalmente mediante trabajo y calor. El trabajo se produce cuando una fuerza desplaza su punto de aplicación, como al comprimir un gas o elevar una carga; el calor, cuando existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos. La primera ley de la termodinámica establece que la variación de energía interna de un sistema es igual al calor recibido menos el trabajo realizado por él, de modo que constituye una expresión del principio de conservación aplicada a los procesos térmicos (Serway y Jewett, 2018).

El calor se transfiere por conducción, convección y radiación. La conducción ocurre por contacto directo entre partículas y predomina en los sólidos; la convección implica el desplazamiento de masas de fluido con distinta temperatura y densidad; la radiación consiste en la emisión de ondas electromagnéticas y no requiere medio material. En la mayoría de los sistemas reales actúan los tres mecanismos de forma simultánea, aunque uno suele predominar. Identificar cuál domina en cada caso permite elegir la estrategia más eficaz para favorecer o impedir la transferencia (Hewitt, 2015).

Los sistemas se clasifican como abiertos, cerrados o aislados según intercambien con su entorno materia y energía, solo energía o ninguna de las dos. Esta clasificación resulta útil para delimitar un proyecto: un termo ideal se aproxima a un sistema aislado, una olla tapada a uno cerrado y una olla destapada a uno abierto. Definir con precisión las fronteras del sistema antes de realizar mediciones evita errores de interpretación y permite plantear balances de energía que expliquen los resultados obtenidos y las diferencias entre ensayos.

1.4.2. Energía involucrada en procesos químicos

Las reacciones químicas absorben o liberan energía porque la ruptura de enlaces requiere energía y su formación la libera. Cuando la energía liberada en la formación de los productos supera la absorbida en la ruptura de los reactivos, la reacción es exotérmica y el entorno se calienta; en el caso contrario, es endotérmica y el entorno se enfría. A presión constante, el calor intercambiado corresponde a la variación de entalpía, cuyo signo negativo indica una reacción exotérmica y cuyo signo positivo señala una endotérmica (Atkins et al., 2018).

La ley de Hess permite calcular la variación de entalpía de una reacción a partir de otras conocidas, dado que la entalpía es una función de estado que no depende del camino seguido. La espontaneidad de un proceso, sin embargo, no depende solo de la entalpía, sino también de la entropía, relacionada con la dispersión de la energía. La energía libre de Gibbs integra ambos factores junto con la temperatura, y su signo indica si un proceso puede ocurrir de forma espontánea en condiciones dadas, como sucede con algunas disoluciones endotérmicas (Atkins et al., 2018).

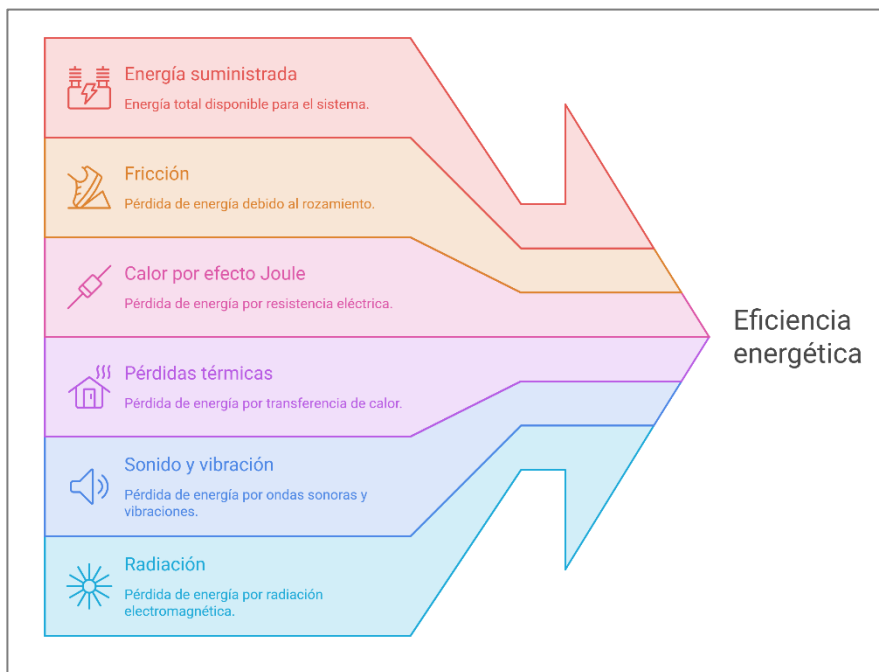
Las aplicaciones prácticas son directas. Las compresas frías instantáneas utilizan la disolución endotérmica del nitrato de amonio, mientras que las bolsas calefactoras aprovechan la oxidación exotérmica del hierro en polvo. La combustión de biocombustibles, el metabolismo de los alimentos y la carga y descarga de baterías también se explican desde la energía química. En el laboratorio escolar, un calorímetro elaborado con vasos de poliestireno expandido permite medir la variación de temperatura en neutralizaciones o disoluciones y estimar el calor intercambiado con una precisión aceptable para fines didácticos.

1.4.3. Conservación y disipación energética

El principio de conservación de la energía establece que esta no se crea ni se destruye, sino que se transforma. La segunda ley de la termodinámica introduce, sin embargo, una restricción decisiva: en toda transformación real, una parte de la energía se degrada en formas menos aprovechables, generalmente calor disipado a baja temperatura. Por ello, ninguna máquina convierte íntegramente el calor en trabajo, y la eficiencia, definida como la razón entre la energía útil obtenida y la energía suministrada, siempre es menor que la unidad (Serway y Jewett, 2018).

La disipación se produce por diversos mecanismos: fricción entre superficies, resistencia eléctrica que calienta los conductores por efecto Joule, pérdidas térmicas a través de paredes mal aisladas, vibraciones y sonido. En un motor de combustión, buena parte de la energía química del combustible termina como calor en los gases de escape y en el sistema de refrigeración. Reconocer estas vías permite al estudiante comprender que mejorar un dispositivo consiste, con frecuencia, en reducir las pérdidas más que en aumentar la energía suministrada (Hewitt, 2015).

El análisis energético de un prototipo puede representarse mediante diagramas de flujo en los que la anchura de cada flecha es proporcional a la energía que circula. Estos diagramas, conocidos como diagramas de Sankey, hacen visible la proporción de energía útil frente a la disipada y orientan la búsqueda de mejoras. La Figura 4 presenta las formas de conservación, transferencia y disipación de la energía en un sistema genérico y constituye una referencia para evaluar la eficiencia de las propuestas desarrolladas en los capítulos posteriores.

Figura 4. *Formas de conservación, transferencia y disipación de la energía*

Nota. Elaborada a partir de Serway y Jewett (2018).

La figura distingue tres destinos de la energía que ingresa en un sistema: la fracción que se conserva como energía útil para la función prevista, la que se transfiere a otros sistemas y la que se disipa en el entorno. Esta representación permite calcular la eficiencia de manera visual y comparar versiones de un mismo prototipo. Su utilidad didáctica radica en que traduce la segunda ley de la termodinámica en una herramienta de diseño, porque cada flecha de pérdida señala un punto concreto donde pueden introducirse aislamiento, lubricación, mejores conductores o cambios de geometría.

1.4.4. Cambios de estado y transferencia de calor

Los cambios de estado, como la fusión, la vaporización, la condensación y la solidificación, se producen a temperatura constante para una presión dada, porque la energía transferida se emplea en modificar las interacciones entre partículas y no en aumentar su energía cinética media. La cantidad de energía necesaria por unidad de masa se denomina calor latente. El agua posee un calor latente de vaporización muy elevado, lo que explica la eficacia de la evaporación del sudor como mecanismo de enfriamiento corporal y la de los botijos de barro para refrescar el agua (Serway y Jewett, 2018).

La temperatura a la que ocurre un cambio de estado depende de la presión. El diagrama de fases representa las condiciones de presión y temperatura en que coexisten las distintas fases de una sustancia, e incluye el punto triple y el punto crítico. A menor presión, la temperatura de ebullición disminuye, fenómeno aprovechado en la destilación al vacío y en la liofilización de alimentos. A mayor presión, la temperatura de ebullición aumenta, principio que explica el funcionamiento de las ollas a presión, de uso extendido en las zonas altas del país (Atkins et al., 2018).

Los materiales de cambio de fase, capaces de absorber o liberar grandes cantidades de calor al fundirse o solidificarse, se utilizan para almacenar energía térmica y estabilizar temperaturas. Las ceras parafínicas, las sales hidratadas e incluso el hielo cumplen esta función en conservadores, prendas térmicas y edificaciones. En el contexto escolar, comparar el tiempo que tarda en calentarse un recipiente con agua líquida frente a otro con hielo a 0 °C permite evidenciar el papel del calor latente y abre posibilidades para diseñar dispositivos de conservación térmica.

1.4.5. Aprovechamiento de transformaciones energéticas

Buena parte de la tecnología consiste en convertir energía de una forma a otra para satisfacer una necesidad. Los paneles fotovoltaicos transforman la radiación solar en electricidad, los generadores convierten energía mecánica en eléctrica mediante inducción electromagnética, las pilas transforman energía química en eléctrica y los calentadores solares convierten radiación en energía térmica. Cada conversión posee una eficiencia característica y unas condiciones de operación que determinan su conveniencia en un contexto particular, así como unos costos de instalación y mantenimiento que no pueden ignorarse en proyectos comunitarios (Serway y Jewett, 2018).

La elección de una transformación energética debe considerar la fuente disponible, la forma de energía requerida, la eficiencia de la conversión y la posibilidad de almacenamiento. En zonas con alta radiación solar, los sistemas fototérmicos sencillos pueden resultar más eficientes y económicos que los fotovoltaicos para calentar agua; donde existen corrientes de agua con caudal suficiente, las microturbinas representan una alternativa viable. Reducir el número de conversiones intermedias suele mejorar la eficiencia global, porque cada etapa introduce pérdidas que se acumulan a lo largo de la cadena.

Para el aprendizaje, las transformaciones energéticas ofrecen un terreno privilegiado de integración disciplinar. La construcción de un pequeño generador con imanes y bobinas, de una celda electroquímica con materiales recuperados o de un calentador solar con botellas plásticas exige aplicar conceptos de física, química, matemática e ingeniería, e incorpora decisiones de diseño estético y funcional que condicionan su uso real. Esta convergencia prepara el terreno para la sección siguiente, dedicada a la integración de ambas ciencias en el enfoque STEAM (Kelley y Knowles, 2016).

1.5. Integración de Física y Química en el enfoque STEAM

El enfoque STEAM propone integrar ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemática en torno a problemas auténticos, superando la fragmentación curricular que presenta cada disciplina como un compartimento separado. La Física y la Química ocupan un lugar central en esta integración, porque proporcionan los principios explicativos sobre los que se construyen artefactos y procesos. La sección examina la articulación de saberes ante problemas complejos, el vínculo con la tecnología y la ingeniería, el aporte de las artes y el diseño, el razonamiento científico aplicado y el tránsito del principio a la solución (Perignat y Katz-Buonincontro, 2019; Belbase et al., 2022).

1.5.1. Articulación de saberes ante problemas complejos

Los problemas del entorno rara vez respetan las fronteras disciplinares. La contaminación de una fuente de agua involucra la química de los contaminantes, la física del flujo y la filtración, la biología de los microorganismos, la matemática de la dosificación y la ingeniería del sistema de tratamiento. Abordar un problema de este tipo desde una sola disciplina produce respuestas parciales. La educación integrada busca que el estudiante reconozca estas conexiones y movilice conocimientos de distintas áreas de manera coordinada y con un propósito compartido (Kelley y Knowles, 2016).

Es posible distinguir grados de integración: multidisciplinar, cuando las disciplinas abordan un tema común de forma paralela; interdisciplinar, cuando los conceptos y habilidades de varias áreas se combinan para profundizar la comprensión; y transdisciplinar, cuando el problema real organiza el aprendizaje y las disciplinas se ponen al servicio de su resolución. Las revisiones de Martín-Páez et al. (2019) y Belbase et al. (2022) advierten sobre la falta de consenso en la definición de estas propuestas y sobre el riesgo de yuxtaponer disciplinas sin lograr una articulación genuina entre ellas.

Para alcanzar una integración efectiva, los proyectos deben partir de preguntas que exijan, de manera natural, el concurso de varias disciplinas. Preguntarse cómo conservar agua apta para el consumo en una comunidad sin red de distribución, por ejemplo, requiere analizar propiedades de materiales, fenómenos de transferencia, procesos químicos de desinfección y cálculos de volumen y costo. Ortiz-Revilla et al. (2020) sostienen que esta integración debe incluir una dimensión epistemológica, de modo que el estudiante comprenda cómo construye conocimiento cada disciplina y de qué manera se complementan.

1.5.2. Vinculación entre ciencia, tecnología e ingeniería

Ciencia, tecnología e ingeniería persiguen fines distintos pero complementarios. La ciencia busca explicar los fenómenos naturales mediante modelos y teorías contrastables; la tecnología comprende el conjunto de artefactos, sistemas y procesos creados para satisfacer necesidades; la ingeniería es la actividad de diseño que aplica el conocimiento científico y matemático para crear soluciones bajo restricciones de costo, seguridad y funcionalidad. En los proyectos STEAM, estas tres dimensiones se alimentan mutuamente y ninguna alcanza su pleno sentido sin las otras (Kelley y Knowles, 2016).

El diseño de ingeniería sigue un ciclo iterativo que incluye la definición del problema, la investigación de antecedentes, la generación de alternativas, la selección de una opción, la construcción de un prototipo, la prueba y la mejora. A diferencia de la indagación científica, cuyo propósito es comprender, el diseño de ingeniería busca optimizar una solución. Ambos procesos comparten, no obstante, la necesidad de formular hipótesis, controlar variables, registrar datos y extraer conclusiones basadas en evidencias, rasgo que facilita su integración didáctica en un mismo proyecto (Kelley y Knowles, 2016).

La tecnología actúa como mediadora entre ambos procesos. Los sensores de temperatura, conductividad o pH conectados a placas programables permiten registrar datos con una resolución y una frecuencia inaccesibles para la medición manual, y las herramientas de modelado ayudan a visualizar estructuras moleculares o a simular el comportamiento de un circuito. Estas herramientas no sustituyen la comprensión conceptual, pero amplían la capacidad del estudiante para investigar, diseñar y comunicar. Su incorporación debe responder a una necesidad del proyecto y no al simple atractivo de la novedad.

1.5.3. Aportes del diseño y la creatividad

La incorporación de las artes al acrónimo STEM, que dio origen a STEAM, respondió a la necesidad de integrar la creatividad, el diseño y la dimensión humana en la formación científica y tecnológica. Perignat y Katz-Buonincontro (2019) identificaron en su revisión diversas interpretaciones de esta incorporación, que van desde el uso de las artes como recurso motivador hasta su consideración como componente del propio proceso de creación e innovación. En el enfoque de este libro, el arte y el diseño se entienden como formas de pensamiento que enriquecen la búsqueda de soluciones.

El diseño aporta al proyecto experimental la atención al usuario, la ergonomía, la estética y la comunicación visual. Un filtro de agua puede ser eficaz desde el punto de vista químico y, aun así, fracasar si resulta difícil de limpiar o poco aceptado por la comunidad que debe usarlo. La creatividad, entendida como la capacidad de generar ideas nuevas y útiles, se estimula mediante técnicas como la lluvia de ideas, el bocetado o los prototipos rápidos. Aguilera y Ortiz-Revilla (2021) reportaron en su revisión sistemática evidencias favorables de las propuestas STEAM sobre la creatividad del estudiantado.

Las artes contribuyen además a la comunicación de los resultados. Infografías, maquetas, videos y exposiciones permiten que los

estudiantes presenten sus proyectos ante públicos diversos y traduzcan conceptos técnicos a lenguajes accesibles. Esta dimensión comunicativa resulta esencial cuando las soluciones se dirigen a la comunidad y requieren su aceptación. Bacich y Holanda (2020) destacan el valor del aprendizaje basado en proyectos para integrar conocimientos en la educación básica mediante productos concretos, que adquieren sentido cuando pueden compartirse y valorarse fuera del aula.

1.5.4. Razonamiento científico aplicado a situaciones reales

El razonamiento científico comprende un conjunto de habilidades que incluye formular preguntas investigables, plantear hipótesis, diseñar experimentos controlados, recoger e interpretar datos, construir explicaciones basadas en evidencias y evaluar la validez de las conclusiones. Estas habilidades no se desarrollan de forma espontánea, sino que requieren oportunidades sistemáticas para ejercitarlas en situaciones auténticas y retroalimentación sobre su calidad. Los proyectos experimentales ofrecen un contexto privilegiado, porque exigen tomar decisiones cuyos resultados pueden verificarse y discutirse con los pares (Quigley et al., 2017).

En situaciones reales, el razonamiento científico debe enfrentar condiciones que los experimentos escolares tradicionales suelen omitir: variables difíciles de controlar, datos con ruido, resultados inesperados y restricciones de tiempo y recursos. Aprender a manejar esta complejidad implica reconocer las fuentes de incertidumbre, repetir mediciones, calcular promedios y dispersiones, y distinguir entre correlación y causalidad. Estas competencias aproximan al estudiante a la práctica científica real, en la que la duda metódica y la revisión de las propias conclusiones constituyen rasgos esenciales del trabajo.

El razonamiento científico aplicado incluye también la argumentación. Justificar la elección de un material, defender la interpretación de un resultado o responder a las objeciones de los compañeros exige articular datos, principios teóricos y conclusiones en una estructura lógica. Quigley et al. (2017) sitúan los problemas auténticos y la indagación dirigida por el estudiante entre las prácticas docentes propias del enfoque STEAM, condiciones que favorecen este tipo de argumentación. El Ministerio de Educación del Ecuador (2016) también ubica la indagación como eje del área de Ciencias Naturales en la educación obligatoria.

1.5.5. Del principio científico a la solución funcional

El tránsito desde un principio científico hasta una solución funcional constituye el eje articulador de este libro. Este recorrido comienza con la identificación de una necesidad, continúa con la selección de los principios físico-químicos pertinentes, avanza hacia el diseño y la construcción de un prototipo y culmina con su evaluación y mejora. Cada etapa exige conocimientos específicos y decisiones fundamentadas, y la calidad de la solución depende de la coherencia entre ellas y de la capacidad para revisar lo decidido a la luz de los datos (Kelley y Knowles, 2016; Belbase et al., 2022).

Un ejemplo ilustra este recorrido. Ante la necesidad de mantener caliente una bebida durante varias horas, el estudiante identifica los mecanismos de transferencia de calor implicados, selecciona materiales de baja conductividad y superficies reflectantes, diseña un recipiente con cámara de aire, lo construye con materiales accesibles, mide la variación de temperatura en el tiempo y compara su desempeño con el de recipientes comerciales. Los resultados orientan modificaciones, como aumentar el espesor del aislante o mejorar el cierre, que se someten a nuevas pruebas en condiciones equivalentes.

Este proceso no es lineal, sino iterativo: los resultados de cada prueba pueden obligar a revisar decisiones previas e incluso a redefinir el problema. La Figura 5 representa este tránsito y sirve como marco general para los capítulos siguientes, en los que se profundiza en las transformaciones de la materia y la energía, en los materiales y procesos para la innovación, en el desarrollo y la optimización de soluciones, y en las aplicaciones físico-químicas ante desafíos concretos del entorno, siempre con este ciclo como referencia metodológica.

Figura 5. *Del principio científico al desarrollo de una solución funcional*



Nota. Elaborada a partir de Kelley y Knowles (2016).

La figura sintetiza el recorrido que conecta el conocimiento científico con la innovación. Cada etapa se alimenta de la anterior y retroalimenta a las precedentes cuando los resultados no satisfacen los requerimientos. El principio científico no aparece como punto de

llegada, según ocurre con frecuencia en la enseñanza tradicional, sino como herramienta para resolver una necesidad concreta. Esta inversión del orden habitual otorga sentido al aprendizaje de la Física y la Química, y permite al estudiante comprobar que las leyes y modelos estudiados tienen consecuencias verificables en el funcionamiento de los objetos que construye.

CAPÍTULO 2

Transformaciones de la
Materia y la Energía
mediante Experiencias
STEAM



Capítulo 2. Transformaciones de la Materia y la Energía mediante Experiencias STEAM

Los principios expuestos en el capítulo anterior adquieren valor formativo cuando el estudiante los utiliza para provocar, observar y controlar transformaciones concretas. Fundir, disolver, calentar, electrolizar o separar son operaciones que permiten verificar modelos teóricos y, al mismo tiempo, obtener productos o efectos con utilidad práctica. Las revisiones recientes sobre educación STEAM en las aulas de ciencias señalan que las experiencias con mayor impacto combinan la indagación experimental con el diseño de soluciones y la reflexión sobre los procesos seguidos (Yulianti et al., 2024; Amanova et al., 2025).

Este capítulo organiza dichas experiencias en cinco ámbitos. El primero examina los cambios de la materia con utilidad práctica; el segundo, la transferencia y el aprovechamiento del calor; el tercero, los procesos eléctricos y electroquímicos; el cuarto, la separación y recuperación de componentes de una mezcla; y el quinto, el control de las transformaciones para obtener resultados funcionales. En cada ámbito se articulan los fundamentos físico-químicos con criterios de diseño, seguridad y medición que orientan la planificación de proyectos experimentales en contextos escolares y universitarios.

2.1. Cambios de la materia con utilidad práctica

La materia puede modificarse sin cambiar su composición, como ocurre al fundir un metal o al estirar una fibra, o puede transformarse en sustancias nuevas mediante reacciones químicas. Ambos tipos de cambio se aprovechan en la fabricación de objetos, la conservación de alimentos, la construcción y el tratamiento de residuos. Esta sección distingue las modificaciones físicas reversibles e irreversibles, analiza las transformaciones químicas controladas, considera la influencia de

las condiciones ambientales, examina el aprovechamiento de los cambios de estado y relaciona las propiedades resultantes con aplicaciones específicas (Overby y Chang, 2022; Callister y Rethwisch, 2022).

2.1.1. Modificaciones físicas reversibles e irreversibles

Una modificación física altera la forma, el tamaño, el estado de agregación o la disposición de las partículas de un material sin cambiar su identidad química. Se considera reversible cuando el sistema puede regresar a su condición inicial al invertir las condiciones que produjeron el cambio, como sucede con la fusión y solidificación del agua o con la deformación de un resorte dentro de su límite elástico. En estos casos, la estructura interna del material se conserva y la energía invertida puede recuperarse, al menos en parte, durante el proceso inverso (Overby y Chang, 2022).

Las modificaciones físicas irreversibles, en cambio, dejan huellas permanentes en la estructura del material aunque su composición no varíe. La deformación plástica de un alambre, la fractura de un vidrio o la molienda de una roca generan dislocaciones, fisuras o nuevas superficies que no desaparecen al retirar la carga. Callister y Rethwisch (2022) explican que el paso del comportamiento elástico al plástico en los metales se produce cuando el esfuerzo supera el límite de fluencia, umbral que determina hasta dónde puede cargarse una pieza sin que pierda su forma original.

Distinguir ambos tipos de modificación orienta decisiones de diseño. Los cambios reversibles resultan útiles para almacenar energía térmica, construir sensores o fabricar elementos elásticos que deben recuperar su forma; los irreversibles se aprovechan para conformar piezas, triturar residuos o aumentar la superficie de contacto de un material antes de una reacción. La Tabla 4 compara ambos tipos de modificación según criterios que el estudiante puede verificar

experimentalmente mediante ensayos sencillos de carga, calentamiento o disolución, registrando en cada caso si el material recupera o no su condición inicial.

Tabla 4. *Diferencias entre modificaciones físicas reversibles e irreversibles*

Criterio	Modificaciones reversibles	Modificaciones irreversibles
Recuperación del estado inicial	Posible al invertir las condiciones	No se recupera aunque cesen las condiciones
Estructura interna	Se conserva sin daño permanente	Presenta fisuras, dislocaciones o nuevas superficies
Energía involucrada	Se recupera en parte durante el proceso inverso	Se disipa como calor, sonido o energía superficial
Ejemplos	Fusión del hielo, disolución de sal, deformación elástica	Deformación plástica, fractura de vidrio, molienda
Utilidad práctica	Almacenamiento térmico, sensores, resortes	Conformado de piezas, trituración, aumento de superficie

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022) y Overby y Chang (2022).

La tabla permite advertir que la reversibilidad no depende del tipo de material sino de la magnitud y la naturaleza del cambio aplicado. Un mismo alambre de cobre se comporta de forma reversible bajo cargas pequeñas y de forma irreversible cuando se supera su límite de fluencia. Esta observación resulta valiosa en los proyectos de construcción, porque obliga a dimensionar los elementos para que trabajen dentro del intervalo elástico. En los proyectos de tratamiento de residuos, por el contrario, la irreversibilidad buscada de la trituración facilita los procesos posteriores de separación, lavado o transformación química.

2.1.2. Transformaciones químicas controladas

Una transformación química controlada es aquella en la que se regulan deliberadamente las cantidades de reactivos, la temperatura, el tiempo y el medio de reacción para obtener un producto definido con el rendimiento y la calidad deseados. El control distingue la experimentación planificada de la simple mezcla de sustancias, porque permite reproducir el resultado, compararlo con las predicciones estequiométricas y ajustar el procedimiento cuando se detectan desviaciones. Overby y Chang (2022) subrayan que el conocimiento del reactivo limitante y del rendimiento teórico constituye la base cuantitativa de cualquier síntesis química.

En el ámbito escolar existen transformaciones controladas de bajo riesgo con valor formativo considerable. La saponificación de aceites usados con hidróxido de sodio, realizada con protección ocular y guantes, permite obtener jabón y discutir la reacción entre ésteres y bases. La precipitación de carbonato de calcio a partir de disoluciones de cloruro de calcio y carbonato de sodio ilustra las reacciones de doble desplazamiento. La gelificación de almidón con glicerina produce películas plásticas biodegradables cuyas propiedades dependen de las proporciones empleadas y de las condiciones de secado.

Estas experiencias adquieren profundidad cuando el estudiante registra variables, calcula rendimientos y explica los resultados en los tres niveles de representación química. Meedee y Yuenyong (2022) mostraron, en un estudio con estudiantes de bachillerato, que las explicaciones científicas sobre reacciones redox mejoran cuando se promueve de forma explícita la articulación entre lo macroscópico, lo submicroscópico y lo simbólico. Esta articulación convierte la obtención de un producto en una oportunidad para comprender por qué las partículas se reorganizan de una manera determinada.

2.1.3. Influencia de las condiciones ambientales

Las transformaciones de la materia no ocurren en el vacío, sino bajo condiciones de temperatura, presión, humedad, radiación y composición atmosférica que modifican su curso. La humedad relativa afecta el secado de pinturas y películas, la velocidad de corrosión de los metales y la absorción de agua de los materiales higroscópicos. La radiación ultravioleta rompe enlaces en muchos polímeros y provoca su fragilización, mientras que el oxígeno del aire favorece la oxidación de grasas, metales y compuestos orgánicos sensibles (Overby y Chang, 2022).

La presión atmosférica constituye una variable ambiental particularmente relevante en la región andina. En Quito, situada a unos 2800 metros sobre el nivel del mar, el agua hierve a una temperatura inferior a la de las ciudades costeras, lo que prolonga los tiempos de cocción y modifica los resultados de destilaciones y evaporaciones. Çengel et al. (2024) explican que la temperatura de saturación de una sustancia depende de la presión a la que se encuentra, relación que puede consultarse en tablas termodinámicas y verificarse con mediciones sencillas.

Considerar las condiciones ambientales implica registrarlas durante los ensayos y, cuando es posible, controlarlas. Un proyecto que compara la velocidad de secado de distintas películas debe realizarse con temperatura y humedad similares para cada muestra; uno que evalúa la corrosión de clavos debe especificar la exposición al aire, al agua y a la sal. La omisión de estas variables explica muchas discrepancias entre resultados obtenidos por diferentes grupos, y su análisis permite al estudiante comprender que los datos experimentales solo son comparables cuando se generan en condiciones equivalentes.

2.1.4. Aprovechamiento de cambios de estado

Los cambios de estado se aprovechan en múltiples tecnologías porque permiten absorber o liberar grandes cantidades de energía a temperatura prácticamente constante. La evaporación del agua enfría superficies, la condensación libera calor en los intercambiadores térmicos, la fusión de ceras estabiliza la temperatura de recipientes y la solidificación de metales permite moldear piezas. El calor latente asociado a cada transición determina cuánta energía puede almacenarse o extraerse por unidad de masa, dato que resulta decisivo al seleccionar una sustancia para una aplicación térmica (Çengel et al., 2024).

Los refrigeradores y las bombas de calor funcionan gracias a un fluido de trabajo que se evapora a baja presión, absorbiendo calor del espacio que se desea enfriar, y se condensa a alta presión, cediendo ese calor al entorno. Este ciclo, descrito con detalle en los textos de termodinámica aplicada, muestra cómo la manipulación de la presión permite desplazar la temperatura de cambio de estado según las necesidades del sistema. En escala doméstica, las vasijas de barro poroso enfrían el agua mediante evaporación superficial, principio que puede reproducirse y cuantificarse en el aula.

En los proyectos escolares, los cambios de estado ofrecen oportunidades de diseño accesibles. Un refrigerador evaporativo construido con dos macetas de barro y arena húmeda permite estudiar la influencia de la humedad ambiental sobre la eficacia del enfriamiento. Un destilador solar aprovecha la evaporación y la condensación para separar agua de sales disueltas. La comparación entre recipientes con y sin material de cambio de fase, como la parafina, evidencia el papel del calor latente en la estabilización térmica y orienta el diseño de conservadores de alimentos o bebidas.

2.1.5. Aplicaciones derivadas de las propiedades resultantes

Toda transformación, física o química, genera un material o sistema con propiedades distintas de las iniciales, y son precisamente esas propiedades las que determinan su utilidad. La cocción de la arcilla produce una cerámica dura y resistente al agua; la carbonización de la biomasa origina un sólido poroso con capacidad adsorbente; el templado del acero incrementa su dureza. Callister y Rethwisch (2022) insisten en que el procesamiento modifica la estructura y, a través de ella, el conjunto de propiedades disponibles para el diseño de un producto.

Identificar la propiedad resultante que se busca obliga a planificar la transformación en sentido inverso: primero se define la función, después la propiedad necesaria y por último el proceso capaz de generarla. Si se requiere un material que retenga colorantes del agua, la porosidad y la superficie específica son las propiedades clave, y la carbonización seguida de activación constituye el proceso adecuado. Si se busca una película flexible y biodegradable, la plastificación del almidón con glicerina aporta la elasticidad necesaria sin recurrir a derivados del petróleo.

Este razonamiento vincula la química de las transformaciones con la ingeniería de productos y con la sostenibilidad, porque muchas de las transformaciones útiles pueden realizarse a partir de residuos agrícolas o domésticos. La Tabla 5 reúne transformaciones representativas, las propiedades que generan y las aplicaciones que se derivan de ellas, y sirve como punto de partida para que el estudiante proponga procesos alternativos adaptados a los recursos de su entorno y a las necesidades de su comunidad, con especial atención a los residuos que se generan en mayor cantidad en su localidad.

Tabla 5. *Propiedades resultantes de las transformaciones y sus aplicaciones*

Transformación	Propiedad resultante	Aplicaciones
Cocción de arcilla	Dureza y menor permeabilidad	Recipientes, ladrillos, filtros cerámicos
Carbonización de biomasa	Porosidad elevada y capacidad adsorbente	Filtros de agua, control de olores, combustible
Vulcanización del caucho	Elasticidad y resistencia térmica	Juntas, neumáticos, amortiguadores
Fraguado del cemento	Resistencia a la compresión	Elementos estructurales y bloques
Saponificación de grasas	Actividad tensoactiva	Productos de limpieza a partir de aceite usado
Templado del acero	Mayor dureza superficial	Herramientas de corte y piezas de desgaste
Plastificación del almidón	Película flexible y biodegradable	Envolturas, recubrimientos, bioplásticos

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022) y Overby y Chang (2022).

La tabla muestra que transformaciones muy diversas responden a un mismo principio: la modificación controlada de la estructura para obtener una propiedad deseada. Varias de ellas, como la carbonización de biomasa, la saponificación de aceite usado o la plastificación del almidón, pueden realizarse con materiales de bajo costo y riesgo moderado, lo que las vuelve adecuadas para proyectos escolares. Otras, como el templado del acero o la vulcanización, exigen condiciones de temperatura o reactivos que conviene reservar para demostraciones supervisadas. En todos los casos, la propiedad resultante debe verificarse mediante ensayos antes de declarar que el producto cumple su función.

2.2. Transferencia y aprovechamiento térmico

El calor fluye espontáneamente desde las regiones de mayor temperatura hacia las de menor temperatura mediante conducción, convección y radiación. Controlar ese flujo es el objetivo de numerosas tecnologías cotidianas, desde las ollas y los termos hasta las viviendas bioclimáticas y los colectores solares. Esta sección analiza cada mecanismo de transferencia en relación con los materiales que lo favorecen o lo dificultan, distingue los materiales aislantes de los conductores y examina aplicaciones orientadas a la eficiencia térmica en contextos domésticos y comunitarios (Çengel et al., 2024).

2.2.1. Conducción en materiales de diferente naturaleza

La conducción térmica es la transferencia de energía entre partículas adyacentes de un material sin desplazamiento de masa. La ley de Fourier establece que el flujo de calor por conducción es proporcional al área transversal, a la diferencia de temperatura y a la conductividad térmica del material, e inversamente proporcional al espesor que debe atravesar. Esta relación explica por qué las paredes gruesas de adobe mantienen estable la temperatura interior de las viviendas y por qué los recipientes de cocción se fabrican con metales de alta conductividad (Çengel et al., 2024).

El mecanismo microscópico de la conducción depende de la naturaleza del material. En los metales, los electrones libres transportan la mayor parte de la energía térmica, lo que explica la correlación entre conductividad eléctrica y térmica. En los sólidos no metálicos, la energía se transmite mediante vibraciones colectivas de la red cristalina, y su eficacia disminuye con el desorden estructural. En los gases, la conducción es muy baja porque las moléculas están separadas y chocan con poca frecuencia, propiedad que aprovechan los aislantes que atrapan aire en pequeñas celdas (Callister y Rethwisch, 2022).

Las diferencias entre materiales son considerables y pueden abarcar varios órdenes de magnitud. El cobre conduce el calor miles de veces mejor que el poliestireno expandido, y el vidrio lo hace varias veces mejor que la madera. Estas diferencias pueden evidenciarse en el aula colocando varillas de distintos materiales en contacto con agua caliente y registrando el tiempo que tarda en fundirse una gota de cera situada en su extremo. La Tabla 6 presenta valores aproximados de conductividad térmica de materiales frecuentes en proyectos experimentales.

Tabla 6. *Comportamiento térmico de materiales de diferente naturaleza*

Material	Naturaleza	Conductividad térmica aproximada (W/m·K)	Comportamiento
Cobre	Metal	Cerca de 400	Conductor excelente
Aluminio	Metal	Cerca de 240	Conductor muy bueno y liviano
Acero	Aleación metálica	Entre 15 y 50	Conductor moderado según su composición
Vidrio	Cerámico amorfo	Cerca de 1	Conductor pobre
Agua líquida	Líquido	Cerca de 0,6	Conductor pobre con alta capacidad calorífica
Madera seca	Material orgánico fibroso	Entre 0,1 y 0,2	Aislante moderado
Poliestireno expandido	Polímero celular	Cerca de 0,03	Aislante muy eficaz
Aire en reposo	Gas	Cerca de 0,026	Aislante cuando no circula

Nota. Valores aproximados a temperatura ambiente, elaborados a partir de Çengel et al. (2024) y Callister y Rethwisch (2022).

La tabla revela que los mejores aislantes sólidos, como el poliestireno expandido, deben buena parte de su eficacia al aire atrapado en su estructura celular, cuya conductividad es muy baja siempre que no pueda circular. Esta observación explica el funcionamiento de materiales accesibles como la lana, el cartón corrugado, la cascarilla de arroz o el papel arrugado, que también retienen aire entre sus fibras o partículas. Los metales, en el extremo opuesto, son adecuados cuando se necesita distribuir o disipar calor con rapidez. La combinación de ambos tipos de material en un mismo dispositivo permite dirigir el flujo térmico según la función prevista.

2.2.2. Convección en líquidos y gases

La convección es la transferencia de calor asociada al movimiento de un fluido. Cuando una porción de líquido o gas se calienta, su densidad disminuye y tiende a ascender, mientras que el fluido más frío y denso desciende para ocupar su lugar. Este desplazamiento genera corrientes de convección natural que distribuyen la energía térmica en el volumen del fluido. Si el movimiento es impulsado por un ventilador, una bomba o el viento, se habla de convección forzada, cuya eficacia para transferir calor es generalmente mayor (Çengel et al., 2024).

La tasa de transferencia por convección se describe mediante la ley de enfriamiento de Newton, que la relaciona con el área expuesta, la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, y un coeficiente de transferencia que depende de la velocidad del fluido, su viscosidad y la geometría del sistema. Por esta razón, una bebida se enfría más rápido cuando se sopla sobre ella y una habitación se calienta de manera desigual si el aire no circula. Los radiadores, las chimeneas solares y los calentadores de agua por termosifón aprovechan estos principios.

Los proyectos escolares pueden visualizar la convección mediante colorantes en agua calentada desde un punto, o mediante el

movimiento de papel liviano sobre una fuente de calor. Un calentador solar de agua construido con botellas plásticas y tubería puede funcionar por termosifón sin necesidad de bomba, siempre que el depósito se ubique por encima del colector. Evaluar la influencia de la inclinación del colector, el diámetro de la tubería o la altura del depósito sobre la temperatura final del agua convierte el dispositivo en un objeto de investigación experimental.

2.2.3. Radiación y transferencia de energía

La radiación térmica es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas por cualquier cuerpo con temperatura superior al cero absoluto. A diferencia de la conducción y la convección, no requiere un medio material, lo que explica que la energía solar llegue a la Tierra a través del espacio. La potencia emitida por una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, según la ley de Stefan-Boltzmann, y depende de su emisividad, propiedad que varía entre cero y uno según el material y el acabado superficial (Çengel et al., 2024).

Las superficies que absorben bien la radiación también la emiten bien a la misma longitud de onda, relación conocida como ley de Kirchhoff de la radiación. Las superficies negras y mates poseen absorptividad y emisividad elevadas, mientras que las metálicas pulidas reflejan la mayor parte de la radiación incidente y emiten poco. Este comportamiento explica que los termos tengan paredes plateadas para reducir las pérdidas radiativas y que los colectores solares utilicen recubrimientos oscuros para maximizar la absorción de energía solar.

El efecto invernadero que se produce bajo una cubierta de vidrio o plástico transparente constituye un recurso de diseño valioso. La cubierta deja pasar la radiación solar visible, que es absorbida por las superficies interiores y reemitida como radiación infrarroja, a la cual el vidrio es mucho menos transparente. Esta retención de energía permite

que cocinas solares, deshidratadores e invernaderos alcancen temperaturas superiores a las del ambiente. En los proyectos experimentales, comparar cajas con y sin cubierta, o con interiores de distinto color, permite cuantificar la contribución de cada factor.

2.2.4. Materiales aislantes y conductores

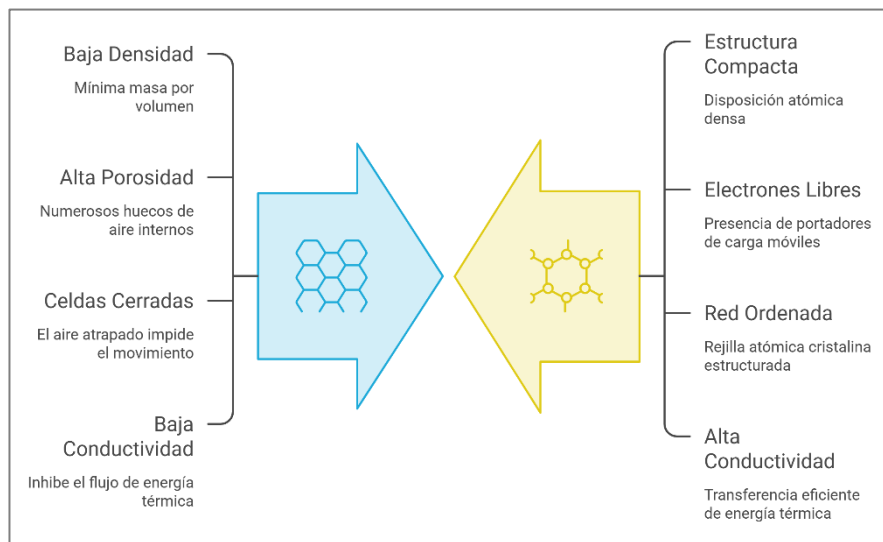
Un material aislante térmico reduce el flujo de calor entre dos regiones con diferente temperatura, mientras que un conductor lo facilita. La elección entre ambos depende de la función del dispositivo: un recipiente para cocinar requiere un fondo conductor que transmita rápidamente el calor al alimento, y un asa aislante que proteja la mano; un conservador de hielo requiere paredes aislantes en todas sus caras. La resistencia térmica de una capa de material aumenta con su espesor y disminuye con su conductividad, lo que permite comparar configuraciones distintas (Çengel et al., 2024).

Los aislantes eficaces comparten ciertas características estructurales: baja densidad, alta porosidad, celdas cerradas que impiden la convección interna y, en algunos casos, superficies reflectantes que limitan la radiación. Los materiales naturales como la lana de oveja, la fibra de coco, el corcho o la paja cumplen varios de estos requisitos y presentan un impacto ambiental menor que los aislantes sintéticos. Su desempeño, sin embargo, puede disminuir con la humedad, porque el agua que ocupa los poros conduce el calor mucho mejor que el aire.

Los conductores térmicos se seleccionan cuando se necesita extraer, distribuir o igualar temperaturas. Los disipadores de aluminio de los equipos electrónicos, las placas absorbentes de cobre de los colectores solares y los fondos difusores de las ollas son ejemplos de esta función. La Figura 6 sintetiza las características que distinguen a los materiales aislantes de los conductores térmicos y orienta la elección de materiales en los proyectos de eficiencia térmica que se

desarrollan en este libro, en particular los dispositivos de conservación térmica del Capítulo 5.

Figura 6. Características de los materiales aislantes y conductores térmicos



Nota. Elaborada a partir de Çengel et al. (2024) y Callister y Rethwisch (2022).

La figura muestra que la diferencia entre aislantes y conductores no se reduce al valor de la conductividad, sino que responde a rasgos estructurales identificables. La porosidad y el aire atrapado caracterizan a los aislantes; la estructura compacta y la presencia de electrones libres, a los conductores metálicos. Esta caracterización permite al estudiante predecir el comportamiento de materiales no incluidos en las tablas, como un residuo agrícola o un textil reciclado, y formular hipótesis que luego puede verificar experimentalmente. Así, la elección de materiales deja de ser intuitiva y se apoya en criterios físicos explícitos.

2.2.5. Aplicaciones orientadas a la eficiencia térmica

La eficiencia térmica de un dispositivo se define como la fracción de la energía suministrada que se emplea en la función prevista. En una cocina, representa la proporción del calor del combustible que efectivamente llega al alimento; en un calentador solar, la fracción de la radiación incidente que eleva la temperatura del agua. Mejorar la eficiencia implica reducir las pérdidas por conducción a través de las paredes, por convección hacia el aire circundante y por radiación desde las superficies calientes, actuando sobre cada mecanismo con la estrategia adecuada (Çengel et al., 2024).

Las aplicaciones domésticas y comunitarias ofrecen ejemplos concretos. Las cajas de cocción retenida, conocidas como cocinas de heno, permiten terminar la cocción de alimentos en un recipiente aislado después de un breve calentamiento inicial, con ahorro considerable de combustible. Las cortinas térmicas, los burletes en puertas y ventanas y las cubiertas en ollas reducen pérdidas de manera sencilla. En la construcción andina, los muros gruesos de tierra aprovechan su masa térmica para almacenar calor durante el día y liberarlo durante la noche, amortiguando las variaciones de temperatura.

Estas aplicaciones permiten diseñar proyectos con impacto medible en el consumo energético de los hogares. El estudiante puede construir una caja de cocción retenida con cartón, papel y tela, cocinar un alimento con y sin ella, y comparar el consumo de gas o el tiempo de uso de la hornilla. La cuantificación del ahorro, expresada en energía y en costo, añade una dimensión matemática y económica al proyecto, y facilita la comunicación de sus beneficios a la comunidad mediante recursos gráficos y demostraciones públicas.

2.3. Procesos eléctricos y electroquímicos

La electricidad y la química están unidas por el movimiento de electrones. En los conductores metálicos, los electrones se desplazan bajo la acción de un campo eléctrico; en las reacciones redox, se transfieren de una especie a otra. Cuando ambos fenómenos se acoplan en una celda electroquímica, la energía química puede convertirse en eléctrica y viceversa. Esta sección examina el movimiento de cargas, el comportamiento eléctrico de los materiales, la conversión entre energía química y eléctrica, el funcionamiento de las celdas y sus aplicaciones experimentales (Atkins et al., 2023; Overby y Chang, 2022).

2.3.1. Movimiento de cargas y conducción eléctrica

La corriente eléctrica corresponde al flujo neto de carga a través de una sección de un conductor por unidad de tiempo. En los metales, los portadores son electrones que se mueven con una velocidad de deriva muy pequeña, del orden de milímetros por segundo, aunque la señal eléctrica se propaga casi instantáneamente a lo largo del circuito. Esta distinción ayuda a corregir la idea errónea de que los electrones recorren rápidamente el cable desde la fuente hasta el receptor, confusión frecuente en los estudiantes de todos los niveles.

En las disoluciones electrolíticas, la corriente se debe al desplazamiento simultáneo de cationes hacia el electrodo negativo y de aniones hacia el positivo. La conductividad de una disolución depende del número de iones, de su carga y de su movilidad, que a su vez varía con la temperatura y la viscosidad del medio. Atkins et al. (2023) describen cómo la conductividad molar de los electrolitos fuertes disminuye ligeramente con la concentración a causa de las interacciones entre iones, mientras que la de los electrolitos débiles depende sobre todo de su grado de disociación.

La comprensión de ambos mecanismos de conducción resulta indispensable en los proyectos electroquímicos, donde coexisten un circuito externo con conducción electrónica y un electrolito con conducción iónica. Meedee y Yuenyong (2022) documentaron que muchos estudiantes suponen que los electrones atraviesan la disolución, idea que dificulta la comprensión del funcionamiento de las pilas. Las actividades que representan explícitamente el movimiento de iones y electrones en cada parte del sistema contribuyen a superar esta dificultad y a construir modelos mentales coherentes y aplicables a dispositivos distintos de los estudiados en clase.

2.3.2. Comportamiento eléctrico de distintos materiales

El comportamiento eléctrico de un material se caracteriza por su resistividad, su respuesta a la temperatura y su interacción con los campos eléctricos. Los conductores metálicos presentan resistividades muy bajas que aumentan con la temperatura, porque las vibraciones de la red dificultan el avance de los electrones. Los semiconductores muestran el comportamiento opuesto: su resistividad disminuye al calentarse, dado que un mayor número de electrones adquiere energía suficiente para pasar a la banda de conducción. Los aislantes, por su parte, mantienen resistividades extremadamente altas en condiciones normales (Callister y Rethwisch, 2022).

Algunos materiales presentan propiedades eléctricas especiales con aplicaciones tecnológicas. Los materiales piezoeléctricos, como el cuarzo, generan una diferencia de potencial al ser deformados y se utilizan en encendedores, micrófonos y sensores de presión. Los dieléctricos se polarizan en presencia de un campo eléctrico y permiten almacenar carga en los condensadores. Los materiales fotoconductores modifican su conductividad al recibir luz, principio empleado en las fotorresistencias que controlan el encendido

automático de lámparas en el alumbrado público, y que pueden incorporarse con facilidad a prototipos escolares.

En el trabajo experimental, la medición de la resistencia con un multímetro permite caracterizar materiales y detectar cambios asociados a la temperatura, la humedad o la iluminación. Un grafito trazado con lápiz sobre papel conduce la electricidad y su resistencia varía con la longitud y el grosor del trazo, lo que permite verificar la dependencia geométrica de la resistencia. La construcción de sensores sencillos con fotorresistencias o termistores conectados a placas programables integra los conocimientos físicos con la programación y el análisis de datos, en consonancia con el enfoque STEAM.

2.3.3. Conversión entre energía química y eléctrica

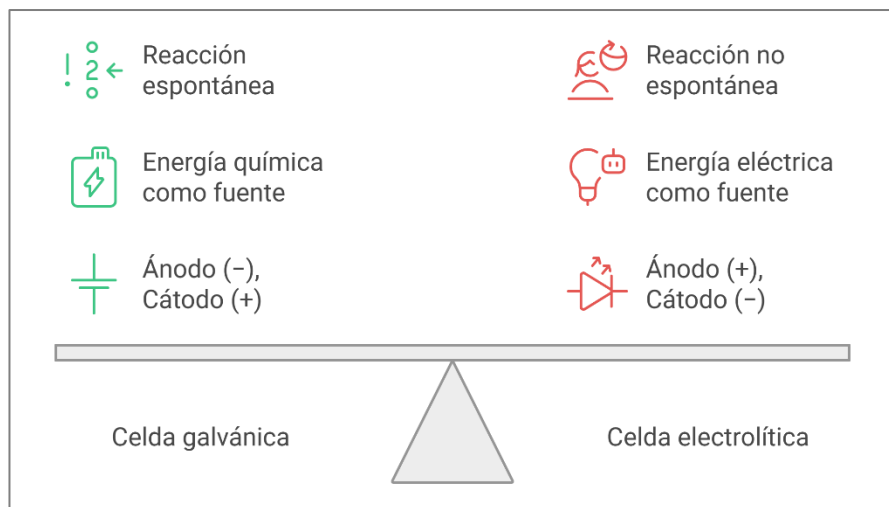
Una reacción redox espontánea libera energía que, en condiciones ordinarias, se disipa como calor. Si los reactivos se separan físicamente y se conectan mediante un circuito externo y un medio conductor iónico, los electrones transferidos deben recorrer el circuito, y la energía química se transforma en trabajo eléctrico. Este es el principio de las celdas galvánicas. La máxima energía eléctrica obtenible está determinada por la variación de energía libre de Gibbs de la reacción, que se relaciona directamente con el potencial de la celda (Atkins et al., 2023).

El proceso inverso tiene lugar en las celdas electrolíticas, donde una fuente externa suministra energía eléctrica para provocar una reacción no espontánea. La electrólisis del agua produce hidrógeno y oxígeno, la del cloruro de sodio fundido genera sodio metálico y cloro, y la electrodeposición permite recubrir objetos con capas metálicas protectoras o decorativas. Las baterías recargables combinan ambos procesos: funcionan como celdas galvánicas durante la descarga y

como celdas electrolíticas durante la carga, lo que les permite almacenar energía de forma reversible (Overby y Chang, 2022).

La ecuación de Nernst relaciona el potencial de una celda con las concentraciones de las especies que intervienen, y explica por qué el voltaje de una pila disminuye a medida que se consumen los reactivos. Esta relación cuantitativa ofrece un terreno fértil para la integración con la matemática, porque implica funciones logarítmicas y permite contrastar predicciones con mediciones. La Figura 7 representa la conversión entre energía química y eléctrica en ambos sentidos, destacando las semejanzas y diferencias entre celdas galvánicas y electrolíticas.

Figura 7. *Conversión entre energía química y energía eléctrica*



Nota. Elaborada a partir de Atkins et al. (2023) y Overby y Chang (2022).

La figura pone de relieve que ambos tipos de celda comparten los mismos componentes y la misma definición de ánodo y cátodo, según ocurra en ellos la oxidación o la reducción, aunque difieran en el signo de los electrodos y en el sentido de la conversión energética. Esta

comparación resulta útil para evitar una confusión habitual, que consiste en asociar el ánodo siempre con el polo positivo. Al presentar la batería recargable como un sistema que alterna ambos modos, la figura vincula el contenido con tecnologías cotidianas y prepara el análisis de los componentes de una celda.

2.3.4. Celdas electroquímicas y principios de funcionamiento

Una celda electroquímica consta de dos electrodos, un electrolito y, cuando las semiceldas están separadas, un puente salino o una membrana que permite el paso de iones sin que las disoluciones se mezclen. En el ánodo ocurre la oxidación y se liberan electrones hacia el circuito externo; en el cátodo, esos electrones son captados por la especie que se reduce. El puente salino mantiene la neutralidad eléctrica de cada semicelda al permitir la migración de iones, condición sin la cual la reacción se detendría en pocos instantes (Overby y Chang, 2022).

El potencial de la celda en condiciones estándar se calcula como la diferencia entre los potenciales estándar de reducción del cátodo y del ánodo. Una pila de Daniell, formada por zinc en disolución de sulfato de zinc y cobre en disolución de sulfato de cobre, genera algo más de un voltio. En la práctica, el voltaje medido es menor a causa de la resistencia interna, las concentraciones no estándar y los fenómenos de polarización en la superficie de los electrodos, factores que el estudiante puede investigar variando las condiciones del montaje (Atkins et al., 2023).

Comprender la función de cada componente permite diseñar celdas con materiales accesibles y diagnosticar sus fallas. Si una pila de limón no enciende un diodo, la causa puede ser un voltaje insuficiente, que se corrige conectando varias celdas en serie, o una corriente demasiado baja, que se mejora aumentando el área de los electrodos. La Tabla 7 describe los componentes de una celda electroquímica y sus

funciones, y constituye una guía para planificar y depurar montajes experimentales antes de invertir tiempo en mediciones más elaboradas.

Tabla 7. Componentes y funciones de una celda electroquímica

Componente	Función	Ejemplo en montajes escolares
Ánodo	Electrodo donde ocurre la oxidación y se liberan electrones	Lámina de zinc o clavo galvanizado
Cátodo	Electrodo donde ocurre la reducción y se captan electrones	Lámina o alambre de cobre
Electrolito	Medio que permite la conducción iónica	Jugo de limón, vinagre, disolución salina
Puente salino o separador	Mantiene la neutralidad eléctrica e impide la mezcla directa	Papel o tela empapados en disolución salina
Circuito externo	Conduce los electrones del ánodo al cátodo	Cables con pinzas de cocodrilo
Receptor o instrumento	Aprovecha o mide la energía generada	Diodo emisor de luz, multímetro

Nota. Elaborada a partir de Overby y Chang (2022) y Atkins et al. (2023).

La tabla organiza la celda como un sistema en el que cada componente cumple una función insustituible. Esta perspectiva sistémica facilita el diagnóstico: cuando un montaje no funciona, el estudiante puede revisar componente por componente hasta identificar la causa. Los ejemplos propuestos muestran que es posible reproducir los elementos esenciales de una celda con materiales domésticos, siempre que se respete la diferencia de actividad entre los metales y se garantice la conducción iónica. La tabla anticipa además los proyectos

del Capítulo 5, en los que se desarrolla una aplicación electroquímica basada en materiales accesibles.

2.3.5. Aplicaciones experimentales de la electroquímica

La electroquímica ofrece un repertorio amplio de experiencias con valor formativo y práctico. La construcción de pilas con frutas, tubérculos o disoluciones salinas permite comparar el efecto del electrolito y de los metales sobre el voltaje y la corriente. La electrólisis del agua con electrodos de grafito y una fuente de baja tensión muestra la producción de gases en proporción volumétrica de dos a uno, coherente con la fórmula del agua. La electrodeposición de cobre sobre una llave o una moneda ilustra la reducción de iones metálicos en el cátodo (Overby y Chang, 2022).

Otras aplicaciones se relacionan con la protección de materiales y la sostenibilidad. La protección catódica de un clavo de hierro mediante su conexión con una lámina de zinc o magnesio demuestra cómo un metal más activo se sacrifica para evitar la corrosión de otro. La recuperación de cobre a partir de disoluciones residuales mediante desplazamiento con hierro combina la electroquímica con la gestión de residuos. Estas experiencias conectan los principios teóricos con problemas reales de infraestructura, economía y ambiente, y amplían la mirada del estudiante sobre la utilidad de la química.

La seguridad debe acompañar todas estas experiencias. Las fuentes de alimentación deben ser de baja tensión, los gases producidos en la electrólisis no deben acumularse cerca de llamas y las disoluciones de sulfato de cobre requieren manipulación con guantes y disposición adecuada. El uso de sensores y registradores de datos permite, además, obtener curvas de voltaje en función del tiempo que revelan la descarga progresiva de una pila. Estas curvas constituyen un material valioso para el análisis matemático y para la discusión sobre la vida útil de los dispositivos.

2.4. Separación y recuperación de componentes

La mayor parte de los materiales naturales y residuales son mezclas de varias sustancias. Separar sus componentes permite purificar agua, recuperar materiales valiosos, eliminar contaminantes y obtener productos de mayor calidad. Cada método de separación aprovecha una diferencia en alguna propiedad física de los componentes, como el tamaño de partícula, la densidad, la volatilidad o la solubilidad. Esta sección describe las características de mezclas y disoluciones, examina la filtración, la decantación y la destilación, y analiza la combinación de procesos para recuperar sustancias (Overby y Chang, 2022).

2.4.1. Características de mezclas y disoluciones

Una mezcla es la combinación de dos o más sustancias que conservan su identidad química y pueden separarse por medios físicos. Las mezclas heterogéneas presentan regiones con composición distinta que pueden distinguirse a simple vista o con microscopio, como la arena en agua o el aceite sobre el vinagre. Las mezclas homogéneas, o disoluciones, tienen una composición uniforme en todo su volumen, como el agua salada o el aire. Entre ambos extremos se sitúan los coloides, cuyas partículas son demasiado pequeñas para sedimentar pero suficientemente grandes para dispersar la luz (Overby y Chang, 2022).

El tamaño de las partículas dispersas constituye el criterio principal para clasificar las mezclas y para elegir el método de separación. En las disoluciones, las partículas tienen dimensiones moleculares o iónicas, inferiores a un nanómetro, y atraviesan cualquier filtro convencional. En los coloides, oscilan aproximadamente entre uno y mil nanómetros y producen el efecto Tyndall, que hace visible el haz de luz que atraviesa la mezcla. En las suspensiones, las partículas son mayores y terminan

sedimentando por acción de la gravedad si la mezcla permanece en reposo.

La concentración de una disolución expresa la cantidad de soluto presente en una cantidad dada de disolución o de disolvente, y puede expresarse en porcentaje en masa, molaridad o partes por millón, entre otras unidades. La solubilidad indica la concentración máxima que puede alcanzarse a una temperatura dada, y su dependencia térmica se aprovecha en la cristalización. La Tabla 8 resume las características de mezclas y disoluciones según su composición, junto con los métodos de separación más adecuados para cada caso.

Tabla 8. Características de mezclas y disoluciones según su composición

Tipo de mezcla	Tamaño de partícula	Características observables	Método de separación y ejemplo
Disolución	Menor a 1 nm	Homogénea, transparente, no sedimenta ni dispersa la luz	Evaporación o destilación; agua con sal
Coloide	Entre 1 y 1000 nm	Aspecto uniforme, dispersa la luz por efecto Tyndall	Coagulación o centrifugación; leche, gelatina
Suspensión	Mayor a 1000 nm	Heterogénea, turbia, sedimenta en reposo	Decantación y filtración; agua con arcilla
Mezcla heterogénea gruesa	Visible a simple vista	Componentes distinguibles	Tamizado o separación manual; grava y arena

Nota. Elaborada a partir de Overby y Chang (2022) y Atkins et al. (2023).

La tabla establece una correspondencia directa entre el tamaño de las partículas y el método de separación más eficaz. Esta correspondencia permite al estudiante razonar antes de actuar: si el agua turbia de una

quebrada contiene partículas que sedimentan, la decantación y la filtración serán suficientes para clarificarla; si además contiene sales disueltas, se requerirá evaporación o destilación. La inclusión de los coloides advierte que ciertas partículas escapan a la filtración común y exigen tratamientos adicionales, como la coagulación, un aspecto que se retoma en el Capítulo 5 al abordar el acondicionamiento del agua.

2.4.2. Filtración y separación por tamaño de partículas

La filtración separa partículas sólidas de un fluido haciéndolo pasar a través de un medio poroso que retiene las partículas de tamaño superior al de sus poros. La eficacia del proceso depende del tamaño y la distribución de los poros, del espesor del lecho filtrante, de la velocidad de paso del fluido y de la naturaleza de las partículas. En los filtros de profundidad, como los de arena, las partículas quedan retenidas en el interior del lecho y no solo en su superficie, lo que prolonga el tiempo de funcionamiento antes de la colmatación.

Los filtros de múltiples capas combinan materiales de granulometría decreciente, como grava, arena gruesa y arena fina, para retener progresivamente partículas cada vez más pequeñas. La incorporación de carbón activado añade un mecanismo distinto, la adsorción, que retiene moléculas disueltas responsables de color, olor y sabor. Décima (2024) elaboró un filtro casero con carbón vegetal activado mediante jugo de limón, verificó su eficacia con agua contaminada con tierra y restos vegetales, y comprobó que estudiantes de secundaria podían reproducir el diseño con resultados comparables.

El tamizado constituye una variante de separación por tamaño aplicable a sólidos secos. Mediante tamices de distinta abertura es posible clasificar arenas, triturados de residuos o semillas según su tamaño, lo que resulta útil para preparar lechos filtrantes homogéneos o para caracterizar materiales. En el trabajo experimental conviene medir la turbidez del agua antes y después de filtrar, ya sea con un

turbidímetro o con un método comparativo sencillo, para cuantificar la eficacia del proceso en lugar de limitarse a una apreciación visual.

2.4.3. Decantación y diferencias de densidad

La decantación separa componentes de una mezcla heterogénea aprovechando sus diferencias de densidad. En una suspensión en reposo, las partículas más densas que el líquido sedimentan por acción de la gravedad, y el líquido clarificado puede retirarse cuidadosamente de la parte superior. En las mezclas de líquidos inmiscibles, como agua y aceite, el líquido menos denso forma una capa superior que puede separarse con un embudo de decantación. La velocidad de sedimentación aumenta con el tamaño y la densidad de las partículas, y disminuye con la viscosidad del líquido.

Cuando las partículas son muy finas, la sedimentación natural puede requerir horas o días. Para acelerarla se emplean coagulantes, sustancias que neutralizan las cargas superficiales de las partículas y favorecen su agregación en flóculos de mayor tamaño que sedimentan con rapidez. El sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado en las plantas de tratamiento de agua, aunque existen coagulantes naturales derivados de semillas y cactáceas que han despertado interés en comunidades rurales por su bajo costo y su disponibilidad local.

La centrifugación amplía el principio de la decantación al sustituir la gravedad por una aceleración centrífuga mucho mayor, lo que permite separar partículas muy pequeñas en poco tiempo. En los proyectos escolares, la decantación puede estudiarse midiendo la altura de la interfase entre líquido clarificado y sedimento a intervalos regulares, y representando los datos en una gráfica. El análisis de la curva obtenida permite estimar velocidades de sedimentación y comparar la eficacia de distintos coagulantes, integrando la experimentación química con la modelización matemática.

2.4.4. Destilación y aprovechamiento de puntos de ebullición

La destilación separa los componentes de una mezcla líquida o de una disolución aprovechando sus diferencias de volatilidad. Al calentar la mezcla, el componente con menor punto de ebullición se evapora en mayor proporción, y su vapor se conduce a un condensador donde vuelve al estado líquido y se recoge por separado. La destilación simple resulta eficaz cuando los puntos de ebullición difieren considerablemente o cuando se separa un líquido de sólidos disueltos, como en la obtención de agua a partir de agua salada (Atkins et al., 2023).

Cuando los componentes tienen puntos de ebullición próximos, se recurre a la destilación fraccionada, en la que una columna de relleno permite repetidas evaporaciones y condensaciones que enriquecen progresivamente el vapor en el componente más volátil. Este es el principio de la refinación del petróleo y de la producción de bebidas destiladas. Algunas mezclas, como la de etanol y agua, forman azeótropos que hierven a composición constante y no pueden separarse completamente por destilación simple, fenómeno que se interpreta mediante los diagramas de fases líquido-vapor.

La destilación solar constituye una aplicación de especial interés para comunidades con acceso limitado a agua potable. Un destilador solar consiste en un recipiente oscuro con agua salobre cubierto por una lámina transparente inclinada; la radiación solar evapora el agua, que se condensa en la cara interior de la cubierta y escurre hacia un canal colector. Evaluar la cantidad de agua destilada obtenida por día en función del área, la inclinación o el color del recipiente permite integrar los principios de transferencia térmica con los de separación de mezclas.

2.4.5. Recuperación de sustancias mediante procesos combinados

Rara vez un solo método de separación basta para obtener un producto de la calidad requerida. En la práctica industrial y en los proyectos experimentales, se combinan varios procesos en una secuencia lógica que va desde la eliminación de los componentes más gruesos hasta la separación de los disueltos. El orden de los procesos importa, porque cada etapa prepara la mezcla para la siguiente y protege los equipos más delicados de la colmatación o el deterioro. Diseñar esa secuencia exige conocer las propiedades de cada componente de la mezcla.

El tratamiento del agua para consumo ilustra esta lógica. Primero se retiran los sólidos grandes mediante rejillas o tamices; después, la coagulación y la decantación eliminan partículas en suspensión; a continuación, la filtración retiene los flóculos residuales; la adsorción con carbón activado reduce compuestos que aportan color, olor o sabor; y la desinfección elimina microorganismos. En la recuperación de sales a partir de residuos, la disolución, la filtración, la evaporación y la cristalización se suceden en un orden semejante, aunque adaptado a la naturaleza de los componentes que se desea recuperar.

Los proyectos basados en procesos combinados desarrollan en el estudiante una visión sistémica de la separación. Cada etapa puede evaluarse por separado, midiendo la turbidez, el color, la conductividad o el pH del producto intermedio, lo que permite identificar la contribución de cada una al resultado final. La Figura 8 presenta una secuencia combinada para la separación y recuperación de sustancias, aplicable tanto al tratamiento de agua como a la recuperación de materiales a partir de residuos domésticos o agrícolas.

Figura 8. Secuencia combinada para la separación y recuperación de sustancias

Nota. Elaborada a partir de Overby y Chang (2022) y Décima (2024).

La figura muestra que cada etapa de la secuencia aprovecha una propiedad física distinta de los componentes, en un orden que avanza desde lo más grueso hacia lo más fino. Esta progresión evita que los sólidos grandes colmaten los filtros y que las partículas en suspensión saturan el carbón activado, lo que prolonga la vida útil de cada etapa. La identificación de la propiedad aprovechada en cada paso permite al estudiante justificar el diseño y adaptarlo a mezclas diferentes, suprimiendo etapas innecesarias o añadiendo otras cuando la composición del material así lo requiere.

2.5. Control de transformaciones para obtener resultados funcionales

Obtener un resultado funcional exige algo más que conocer los principios de una transformación: requiere dominar las condiciones que la gobiernan y ajustar el procedimiento hasta lograr el desempeño buscado. Esta competencia, central en la ingeniería, se desarrolla mediante ciclos de ensayo, medición, análisis y modificación. La sección examina las condiciones que determinan el comportamiento de un proceso, el ajuste de temperatura, presión y concentración, la regulación de tiempos y cantidades, la identificación de resultados no previstos y la modificación del procedimiento para mejorar su desempeño (Belbase et al., 2022; Yulianti et al., 2024).

2.5.1. Condiciones que determinan el comportamiento de un proceso

El comportamiento de un proceso físico o químico depende de un conjunto de variables que pueden clasificarse en tres grupos. Las variables de composición incluyen la naturaleza de los materiales, su pureza y sus proporciones; las variables termodinámicas comprenden la temperatura y la presión; y las variables operativas abarcan el tiempo, la agitación, el tamaño de partícula y la geometría del recipiente. Identificar cuáles de ellas influyen de forma significativa en el resultado constituye el primer paso para controlar cualquier transformación (Atkins et al., 2023).

No todas las variables tienen el mismo peso en todos los procesos. En la disolución de un sólido, la temperatura y la agitación suelen ser determinantes; en la carga de una batería, la corriente aplicada y la temperatura condicionan la eficiencia y la vida útil; en el secado de una película de almidón, la humedad ambiental y el espesor de la capa resultan decisivos. El análisis previo basado en los principios físico-

químicos permite formular hipótesis sobre las variables relevantes y diseñar experimentos para verificarlas, evitando pruebas innecesarias.

La distinción entre variables independientes, dependientes y controladas estructura el diseño experimental. La variable independiente es la que el investigador modifica deliberadamente; la dependiente, la que mide como respuesta; y las controladas, las que mantiene constantes para que no interfieran. Ortiz-Revilla et al. (2021) encontraron que una propuesta STEAM integrada favoreció el desarrollo competencial del alumnado, y entre esas competencias el diseño de experimentos controlados ocupa un lugar central porque permite atribuir los efectos observados a causas identificables y descartar explicaciones alternativas.

2.5.2. Ajuste de temperatura, presión y concentración

La temperatura, la presión y la concentración son las variables más utilizadas para dirigir una transformación hacia el resultado deseado. La temperatura acelera las reacciones, modifica la solubilidad de la mayoría de los sólidos y los gases, y determina el estado de agregación de las sustancias. La presión afecta de manera decisiva a los procesos en los que intervienen gases y a los cambios de estado. La concentración condiciona la velocidad de reacción, la posición del equilibrio químico y el potencial de las celdas electroquímicas (Atkins et al., 2023).

El principio de Le Châtelier ofrece un criterio cualitativo para anticipar el efecto de estas variables sobre un sistema en equilibrio: cuando se perturba una de las condiciones, el sistema evoluciona en el sentido que contrarresta parcialmente la perturbación. Así, aumentar la concentración de un reactivo desplaza el equilibrio hacia los productos, y elevar la temperatura favorece el sentido endotérmico. En la síntesis industrial del amoníaco, la combinación de alta presión, temperatura moderada y catalizador responde a un compromiso entre

rendimiento en el equilibrio y velocidad de reacción (Overby y Chang, 2022).

En el laboratorio escolar, el ajuste de estas variables puede estudiarse con experiencias accesibles. La solubilidad del azúcar o de la sal en agua a diferentes temperaturas permite construir curvas de solubilidad; la cantidad de dióxido de carbono que escapa de una bebida gaseosa a distintas temperaturas ilustra la solubilidad de los gases; el voltaje de una pila con electrolitos de diferente concentración verifica cualitativamente la ecuación de Nernst. La Tabla 9 sintetiza los efectos de estas tres variables sobre distintos procesos de interés experimental.

Tabla 9. *Efectos de la temperatura, presión y concentración sobre distintos procesos*

Variable	Efecto sobre reacciones	Efecto sobre solubilidad y cambios de estado	Ejemplo aplicado
Temperatura	Aumenta la velocidad; desplaza el equilibrio hacia el sentido endotérmico	Aumenta la solubilidad de muchos sólidos y reduce la de los gases	Disolución de azúcar en agua caliente; gaseosa que pierde gas al calentarse
Presión	Favorece el sentido con menor número de moles gaseosos	Eleva la temperatura de ebullición y la solubilidad de los gases	Olla a presión; bebidas carbonatadas envasadas
Concentración	Aumenta la velocidad; desplaza el equilibrio hacia la formación de productos	Determina la saturación y la cristalización	Cristalización de sal por evaporación; voltaje de una pila

Nota. Elaborada a partir de Atkins et al. (2023), Overby y Chang (2022) y Çengel et al. (2024).

La tabla muestra que cada variable actúa simultáneamente sobre la cinética, el equilibrio y las propiedades de las fases, por lo que su modificación puede tener efectos múltiples, a veces contrapuestos. Elevar la temperatura acelera una reacción, pero puede reducir el rendimiento si esta es exotérmica; aumentar la presión mejora la disolución de un gas, pero exige recipientes más resistentes. Reconocer estos compromisos constituye una competencia propia de la ingeniería, que el estudiante desarrolla cuando debe elegir condiciones de operación considerando no solo la química del proceso, sino también la seguridad, el costo energético y la disponibilidad de equipos.

2.5.3. Regulación de tiempos y cantidades

El tiempo y las cantidades de materiales constituyen variables operativas que determinan tanto la eficacia como la eficiencia de un proceso. Una reacción interrumpida antes de completarse produce un rendimiento bajo; una prolongada innecesariamente consume energía y puede favorecer reacciones secundarias. Del mismo modo, un exceso de reactivo encarece el proceso y genera residuos, mientras que una cantidad insuficiente limita la obtención del producto. La estequiometría proporciona la base para calcular las cantidades óptimas, y la cinética orienta la determinación de los tiempos adecuados (Overby y Chang, 2022).

En los procesos físicos, la regulación del tiempo resulta igualmente importante. El tiempo de contacto entre el agua y el carbón activado determina la cantidad de sustancias adsorbidas; el tiempo de sedimentación condiciona la claridad del líquido decantado; el tiempo de exposición solar define la temperatura alcanzada en un colector. Establecer estos tiempos mediante mediciones sistemáticas, en lugar de fijarlos arbitrariamente, permite optimizar el desempeño del dispositivo y documentar las condiciones de operación que garantizan resultados reproducibles por otros grupos o en otros momentos.

La medición precisa de cantidades requiere instrumentos adecuados y procedimientos rigurosos. Las balanzas digitales, las probetas graduadas, las jeringas y los cronómetros permiten registrar masas, volúmenes y tiempos con una precisión suficiente para la mayoría de los proyectos escolares. El registro sistemático de estas magnitudes en tablas y hojas de cálculo facilita el análisis posterior y la comparación entre ensayos. La repetición de cada medición y el cálculo de su promedio y dispersión aportan información sobre la confiabilidad de los resultados y sobre la magnitud del error experimental.

2.5.4. Identificación de resultados no previstos

Los resultados no previstos forman parte inherente del trabajo experimental y constituyen una fuente valiosa de aprendizaje. Una película de almidón que se agrieta al secar, un filtro que libera partículas negras en el agua o una pila cuyo voltaje cae rápidamente son situaciones que obligan a revisar las hipótesis y los procedimientos. Interpretar estos resultados como información, y no como fracasos, representa un cambio de actitud fundamental que aproxima al estudiante a la práctica científica y tecnológica real, donde los errores documentados orientan la investigación posterior.

La identificación de un resultado no previsto comienza con la comparación sistemática entre lo esperado y lo obtenido. Para ello resulta indispensable haber formulado previamente una predicción explícita, cuantitativa cuando sea posible. Una vez detectada la discrepancia, el análisis debe considerar posibles errores de medición, variables no controladas, supuestos teóricos incorrectos o interacciones imprevistas entre componentes. En el caso del filtro que libera partículas negras, por ejemplo, la causa suele ser un lavado insuficiente del carbón o una capa de arena demasiado delgada bajo este.

El registro detallado de las observaciones, incluidas las que parecen irrelevantes, facilita el diagnóstico de los resultados no previstos. Un cuaderno de laboratorio que documente las condiciones ambientales, las cantidades exactas, los tiempos y cualquier incidencia permite reconstruir el experimento y detectar la variable responsable. Amanova et al. (2025) señalan, en su revisión sobre la implementación de STEAM en las escuelas, que estas propuestas buscan formar personas capaces de analizar los problemas de manera crítica y desde diferentes ángulos, disposición que se ejercita precisamente al enfrentar resultados inesperados.

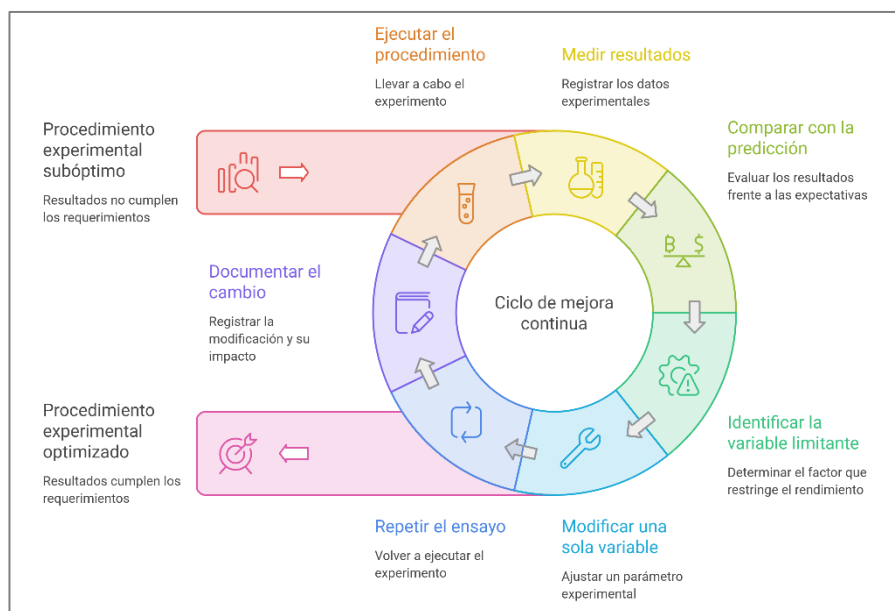
2.5.5. Modificación del procedimiento para mejorar su desempeño

La mejora de un procedimiento experimental sigue una lógica iterativa. A partir del análisis de los resultados, se identifica la variable que más limita el desempeño, se propone una modificación fundamentada, se ejecuta un nuevo ensayo y se compara el resultado con el anterior. Modificar una sola variable en cada iteración permite atribuir los cambios observados a la modificación realizada; cambiar varias a la vez puede producir mejoras, pero impide saber cuál de ellas fue responsable, lo que dificulta la transferencia del aprendizaje a situaciones nuevas.

Cada modificación debe documentarse junto con su justificación y su efecto. Si la sustitución de arena fina por arena de granulometría intermedia reduce el tiempo de filtrado sin afectar la claridad del agua, el cambio se incorpora al procedimiento; si la claridad disminuye, se revierte y se prueba otra alternativa. Este registro constituye la memoria técnica del proyecto y permite a otros grupos reproducir el procedimiento optimizado. Marín-Marín et al. (2021) documentaron el crecimiento sostenido de la investigación sobre STEAM, en la que el ciclo de diseño y mejora figura como componente recurrente.

El proceso de mejora concluye cuando el desempeño alcanza los requerimientos establecidos o cuando las mejoras adicionales dejan de compensar el esfuerzo o el costo que implican. Reconocer ese punto de equilibrio constituye una decisión de ingeniería que integra criterios técnicos, económicos y ambientales. La Figura 9 presenta las etapas para ajustar y mejorar un procedimiento experimental y sirve como guía para los proyectos del Capítulo 4, dedicados al desarrollo y la optimización de soluciones experimentales con enfoque STEAM, donde este ciclo se aplica a propuestas completas.

Figura 9. *Etapas para ajustar y mejorar un procedimiento experimental*



Nota. Elaborada a partir de Belbase et al. (2022) y Yulianti et al. (2024).

La figura representa la mejora como un ciclo cerrado en el que la comparación con los requerimientos actúa como punto de decisión: si el desempeño es suficiente, el procedimiento se considera optimizado; si no lo es, se inicia una nueva iteración. La insistencia en modificar una

sola variable por ciclo garantiza que cada mejora pueda explicarse, y la documentación final convierte la experiencia en conocimiento transferible. Este esquema articula el contenido del capítulo con el enfoque interdisciplinario que promueve el currículo ecuatoriano vigente (Ministerio de Educación del Ecuador, 2021) y con la lógica del diseño de ingeniería.



Transformación de la materia



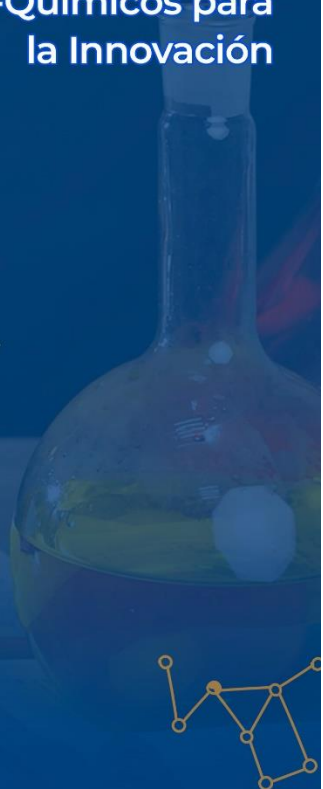
Procesos Físico-Químicos

- Síntesis
- Caracterización
- Optimización



CAPÍTULO 3

Materiales y Procesos Físico-Químicos para la Innovación



Capítulo 3. Materiales y Procesos Físico-Químicos para la Innovación

Toda innovación tecnológica se materializa en objetos contruidos con sustancias concretas y fabricados mediante procesos definidos. La elección de esos materiales y procesos determina el desempeño, el costo, la durabilidad y el impacto ambiental de la solución, por lo que constituye una decisión tan importante como la concepción de la idea. Ashby (2021) sostiene que la selección de materiales debe considerar, además de las propiedades técnicas, el ciclo de vida completo del material, desde su extracción hasta su disposición final o su reincorporación a nuevos usos.

Este capítulo aborda los materiales y procesos físico-químicos desde una perspectiva orientada a la innovación. Se examina en primer lugar la selección científica de materiales según sus propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas; después, las estrategias para modificar esas propiedades y obtener nuevas aplicaciones; a continuación, el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos y la recuperación de materiales a partir de residuos. La última sección analiza la sostenibilidad como criterio transversal de los procesos de innovación y propone herramientas para equilibrar funcionalidad e impacto ambiental.

3.1. Selección científica de materiales

Seleccionar un material de manera científica significa elegirlo a partir de propiedades medibles que se corresponden con los requerimientos de la función, y no por costumbre, disponibilidad inmediata o apariencia. Este procedimiento exige conocer qué propiedades son relevantes para cada aplicación, cómo se miden y qué valores presentan las distintas familias de materiales. La sección examina la resistencia y el comportamiento mecánico, las propiedades térmicas,

la conductividad eléctrica y la respuesta electromagnética, la estabilidad química y los criterios de elección según función y desempeño (Callister y Rethwisch, 2022; Ashby, 2021).

3.1.1. Resistencia y comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico describe la respuesta de un material ante fuerzas aplicadas. El ensayo de tracción, en el que una probeta se estira progresivamente hasta la ruptura, proporciona la curva esfuerzo-deformación, de la cual se obtienen el módulo de elasticidad, el límite elástico, la resistencia máxima a la tracción y la ductilidad. El módulo de elasticidad indica la rigidez del material; el límite elástico, el esfuerzo a partir del cual la deformación se vuelve permanente; y la ductilidad, la capacidad de deformarse plásticamente antes de romperse (Callister y Rethwisch, 2022).

Otras propiedades mecánicas completan la caracterización. La dureza expresa la resistencia a la penetración y al rayado, y se mide mediante ensayos como los de Brinell, Rockwell o Vickers. La tenacidad representa la energía que un material puede absorber antes de fracturarse y resulta decisiva en piezas sometidas a impactos. La resistencia a la fatiga indica la capacidad de soportar cargas repetidas sin fallar, y la resistencia a la fluencia lenta describe el comportamiento bajo cargas sostenidas a temperatura elevada, fenómeno relevante en polímeros incluso a temperatura ambiente.

Las familias de materiales presentan perfiles mecánicos característicos. Los metales combinan rigidez, resistencia y ductilidad; los cerámicos son duros y rígidos, pero frágiles; los polímeros son livianos y tenaces, aunque poco rígidos; y los compuestos pueden diseñarse para reunir propiedades de varias familias. La Tabla 10 resume las propiedades mecánicas más relevantes para la selección de materiales, junto con su significado y los ensayos que permiten estimarlas en contextos escolares con instrumentos sencillos, como

dinamómetros, reglas graduadas y juegos de pesas calibradas, disponibles en la mayoría de los laboratorios.

Tabla 10. *Propiedades mecánicas relevantes para la selección de materiales*

Propiedad	Significado	Estimación en contextos escolares
Módulo de elasticidad	Rigidez del material ante cargas en el intervalo elástico	Medición de la flecha de una viga cargada con pesos conocidos
Límite elástico	Esfuerzo a partir del cual la deformación es permanente	Carga progresiva de alambres o tiras hasta observar deformación residual
Resistencia a la tracción	Esfuerzo máximo antes de la ruptura	Tracción de fibras o tiras con dinamómetro hasta la rotura
Ductilidad	Capacidad de deformarse plásticamente antes de romperse	Comparación del alargamiento de tiras de distintos materiales
Dureza	Resistencia a la penetración y al rayado	Escala comparativa de rayado entre materiales
Tenacidad	Energía absorbida antes de la fractura	Caída de un peso desde alturas crecientes sobre muestras

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022) y Ashby (2021).

La tabla muestra que cada propiedad mecánica responde a una forma distinta de sollicitación y que su estimación no siempre exige equipos de laboratorio especializados. Aunque los ensayos escolares carecen de la precisión de los normalizados, permiten comparar materiales en condiciones equivalentes y ordenarlos según su desempeño, lo que resulta suficiente para muchas decisiones de diseño. La distinción entre resistencia y tenacidad merece especial atención, porque un material muy resistente puede ser frágil, como el vidrio, mientras que otro menos resistente puede absorber más energía antes de romperse, como ocurre con numerosos polímeros.

3.1.2. Propiedades térmicas según condiciones de uso

Las propiedades térmicas determinan cómo responde un material a los cambios de temperatura y al flujo de calor. La conductividad térmica define su capacidad para transmitir calor; la capacidad calorífica específica, la energía necesaria para elevar su temperatura; el coeficiente de dilatación, la variación de sus dimensiones con la temperatura; y la temperatura máxima de servicio, el límite a partir del cual sus propiedades se degradan de forma inaceptable. Estas propiedades deben evaluarse en relación con las condiciones reales de uso previstas para el dispositivo (Çengel et al., 2024).

La resistencia al choque térmico, es decir, la capacidad de soportar cambios bruscos de temperatura sin agrietarse, depende de la combinación entre dilatación, conductividad y resistencia mecánica. El vidrio común se fractura al verter agua hirviendo en un recipiente frío porque su superficie se dilata antes que su interior y se generan tensiones internas; el vidrio de borosilicato, con un coeficiente de dilatación mucho menor, tolera esos cambios. Callister y Rethwisch (2022) explican que este comportamiento condiciona la selección de cerámicos y vidrios para aplicaciones sometidas a ciclos térmicos.

En los proyectos experimentales, las condiciones de uso deben especificarse antes de seleccionar el material. Un colector solar alcanza temperaturas que pueden deformar ciertos plásticos; un recipiente para almacenar alimentos refrigerados exige materiales que no se vuelvan quebradizos a baja temperatura; una estructura expuesta al sol en la región andina experimenta variaciones térmicas diarias considerables. Considerar estos escenarios evita fallas prematuras y orienta la búsqueda de materiales cuyas propiedades térmicas permanezcan estables en todo el intervalo de temperaturas al que estará sometido el dispositivo.

3.1.3. Conductividad eléctrica y respuesta electromagnética

La conductividad eléctrica constituye la propiedad que presenta el intervalo de valores más amplio entre todos los materiales, pues abarca más de veinte órdenes de magnitud entre los mejores conductores metálicos y los mejores aislantes. Esta amplitud permite clasificar los materiales con claridad según su función eléctrica: conductores para transportar corriente, semiconductores para controlarla y aislantes para impedir su paso. Callister y Rethwisch (2022) vinculan estas diferencias con la estructura de bandas electrónicas y con la presencia o ausencia de portadores de carga móviles.

La respuesta electromagnética comprende también las propiedades dieléctricas y magnéticas. Los dieléctricos se caracterizan por su constante dieléctrica, que mide su capacidad para polarizarse, y por su rigidez dieléctrica, que indica el campo eléctrico máximo que soportan sin perforarse. Los materiales ferromagnéticos, como el hierro, el níquel y el cobalto, presentan una magnetización intensa en presencia de campos externos y se emplean en núcleos de transformadores, motores e imanes permanentes. Estas propiedades condicionan el diseño de generadores, sensores y dispositivos de almacenamiento de energía.

En el trabajo experimental, las propiedades eléctricas y magnéticas pueden explorarse con instrumentos accesibles. La medición de la resistencia de alambres de distintos metales y diámetros permite calcular su resistividad; la construcción de un electroimán con un clavo y alambre esmaltado evidencia el efecto de un núcleo ferromagnético sobre el campo generado. La selección del material del núcleo, del conductor de la bobina y del aislante que los separa constituye un ejercicio integrador en el que confluyen propiedades eléctricas, magnéticas y térmicas.

3.1.4. Estabilidad frente a agentes químicos

La estabilidad química de un material expresa su capacidad para mantener su composición y sus propiedades cuando entra en contacto con agentes del entorno. El agua, el oxígeno, los ácidos, las bases, las sales, los disolventes orgánicos y la radiación ultravioleta pueden provocar corrosión, oxidación, hidrólisis, hinchamiento o degradación fotoquímica. Cada familia de materiales presenta vulnerabilidades específicas: los metales tienden a corroerse, los polímeros pueden disolverse o degradarse con la luz y ciertos cerámicos se atacan en medios fuertemente básicos (Overby y Chang, 2022).

La corrosión de los metales constituye un proceso electroquímico en el que el metal se oxida y cede electrones a una especie que se reduce, generalmente el oxígeno disuelto en el agua. Su velocidad aumenta con la humedad, la temperatura, la salinidad y la acidez del medio. Algunos metales, como el aluminio y el acero inoxidable, forman espontáneamente una capa de óxido compacta y adherente que los protege, fenómeno denominado pasivación. El hierro común, en cambio, forma un óxido poroso que se desprende y deja expuesto el metal subyacente (Callister y Rethwisch, 2022).

La evaluación de la estabilidad química debe realizarse en condiciones representativas de las que enfrentará el material durante su uso. Un ensayo de inmersión, en el que muestras de distintos materiales se sumergen durante varios días en agua, agua salada, vinagre o disolución jabonosa, permite comparar su comportamiento mediante la observación de cambios de masa, color, superficie o resistencia. Estos ensayos ofrecen información valiosa para seleccionar materiales destinados a filtros, recipientes o estructuras exteriores, y anticipan los proyectos de protección frente al deterioro del Capítulo 5.

3.1.5. Criterios de elección según función y desempeño

La elección de un material resulta de contrastar sus propiedades con los requerimientos de la función. Ashby (2021) propone un procedimiento en cuatro etapas: traducir los requerimientos de diseño en función, restricciones, objetivos y variables libres; descartar los materiales que no cumplen las restricciones; ordenar los restantes según su desempeño respecto del objetivo; y documentar la información disponible sobre los mejores candidatos. Este procedimiento sistemático evita que la elección dependa de preferencias previas y permite justificarla con argumentos verificables, que otros pueden revisar y discutir a partir de los mismos datos de partida.

Las restricciones son condiciones que el material debe cumplir obligatoriamente, como resistir una temperatura dada o no ser tóxico; los objetivos son magnitudes que se desea maximizar o minimizar, como el peso, el costo o la huella ambiental. Cuando existen varios objetivos, suele ser necesario establecer compromisos, porque el material más liviano rara vez es el más barato. Los índices de desempeño, que combinan varias propiedades en una sola expresión, facilitan la comparación: la relación entre resistencia y densidad, por ejemplo, identifica materiales adecuados para estructuras livianas.

En los contextos escolares, este procedimiento puede adaptarse mediante matrices de decisión en las que cada material candidato se califica según los criterios relevantes, ponderados por su importancia. La disponibilidad local, la seguridad de manipulación y la posibilidad de reutilización se incorporan como criterios adicionales. La Tabla 11 presenta los criterios para seleccionar materiales según función y desempeño, organizados de manera que puedan utilizarse como guía en la planificación de cualquier proyecto experimental, desde un soporte estructural sencillo hasta un dispositivo de tratamiento de agua o de conservación térmica.

Tabla 11. *Criterios para seleccionar materiales según función y desempeño*

Tipo de criterio	Descripción	Ejemplo de aplicación
Función	Tarea principal que debe cumplir el componente	Sostener una carga, aislar calor, conducir corriente
Restricciones	Condiciones de cumplimiento obligatorio	No ser tóxico en contacto con agua para consumo
Objetivos	Magnitudes que se desea maximizar o minimizar	Minimizar el peso o el costo del prototipo
Índices de desempeño	Combinación de propiedades que mide la idoneidad	Relación entre resistencia y densidad
Disponibilidad y costo	Acceso local y precio del material	Uso de cascarilla de arroz o bagazo de caña
Seguridad e impacto	Riesgos de manipulación y efectos ambientales	Preferencia por materiales reciclables o biodegradables

Nota. Elaborada a partir de Ashby (2021) y Callister y Rethwisch (2022).

La tabla ordena los criterios desde los estrictamente funcionales hasta los relacionados con el contexto y el ambiente, reflejando una jerarquía útil en la práctica: primero se asegura que el material pueda cumplir la función y respetar las restricciones, y después se optimizan los objetivos y se consideran la disponibilidad, la seguridad y el impacto. La inclusión de residuos agroindustriales como la cascarilla de arroz o el bagazo de caña, abundantes en la costa ecuatoriana, muestra que los criterios de disponibilidad y sostenibilidad pueden orientar la elección hacia materiales locales que, además, reducen la carga de residuos.

3.2. Modificación de propiedades para nuevas aplicaciones

Cuando ningún material disponible reúne todas las propiedades requeridas, es posible modificar las de un material existente mediante tratamientos físicos, procesos químicos superficiales o la combinación con otros componentes. Estas modificaciones amplían

considerablemente el repertorio de opciones disponibles para el diseño y permiten adaptar materiales abundantes y económicos a funciones exigentes. La sección examina los tratamientos físicos, las modificaciones superficiales químicas, la combinación de componentes, la protección frente al deterioro y la mejora funcional mediante cambios controlados (Callister y Rethwisch, 2022).

3.2.1. Tratamientos físicos de materiales

Los tratamientos físicos modifican la microestructura de un material sin alterar su composición química global. En los metales, los tratamientos térmicos constituyen el recurso más utilizado: el recocido consiste en calentar el metal y enfriarlo lentamente para aliviar tensiones internas y aumentar su ductilidad; el temple implica un enfriamiento rápido que incrementa la dureza; y el revenido, un calentamiento moderado posterior al temple, reduce la fragilidad sin perder toda la dureza adquirida. Callister y Rethwisch (2022) relacionan cada uno de estos tratamientos con transformaciones específicas de la microestructura.

El trabajo en frío constituye otro tratamiento físico de gran importancia. Cuando un metal se deforma plásticamente a temperatura ambiente, mediante laminado, trefilado o martillado, aumenta la densidad de defectos cristalinos llamados dislocaciones, lo que eleva su resistencia y dureza a costa de su ductilidad. Este endurecimiento por deformación explica que un alambre de cobre doblado repetidamente se vuelva cada vez más rígido hasta romperse. El recocido posterior permite recuperar la ductilidad cuando el material debe seguir conformándose, secuencia que los artesanos del metal aplican de manera empírica desde hace siglos y que la ciencia de materiales explica hoy con precisión.

En los polímeros y otros materiales, los tratamientos físicos incluyen la orientación de cadenas mediante estiramiento, que incrementa la

resistencia en la dirección de estiramiento, y el control de la cristalinidad mediante la velocidad de enfriamiento. En los materiales naturales, el secado controlado de la madera reduce su tendencia a deformarse, y la compactación de suelos mejora su resistencia para la construcción. Estos tratamientos demuestran que el procesamiento puede modificar sustancialmente las propiedades de un material sin necesidad de alterar su composición química.

3.2.2. Modificaciones superficiales mediante procesos químicos

Muchas propiedades relevantes para el uso de un material dependen principalmente de su superficie, que es la región expuesta al ambiente, al contacto y al desgaste. Las modificaciones superficiales químicas permiten alterar esa región sin cambiar las propiedades del interior. El anodizado del aluminio, por ejemplo, engrosa electroquímicamente su capa natural de óxido y mejora su resistencia a la corrosión y al desgaste; el fosfatado del acero genera una capa que favorece la adherencia de pinturas; y el galvanizado recubre el hierro con zinc para protegerlo (Overby y Chang, 2022).

Otros procesos superficiales modifican la afinidad de un material por el agua o por otras sustancias. Los tratamientos hidrofóbicos, basados en ceras, siliconas o compuestos fluorados, reducen la absorción de agua en textiles, maderas y piedras. La activación química del carbón, mediante agentes ácidos o básicos seguidos de calentamiento, aumenta su porosidad y su superficie específica, y con ello su capacidad adsorbente. Décima (2024) empleó jugo de limón como agente activante del carbón vegetal y obtuvo un material útil para la filtración de agua, lo que muestra que estos procesos pueden realizarse con reactivos de bajo riesgo.

La electrodeposición constituye otra estrategia de modificación superficial con aplicaciones decorativas y funcionales. Mediante el paso de corriente a través de una disolución que contiene iones

metálicos, se deposita una capa delgada de cobre, níquel, cromo u otros metales sobre la pieza que actúa como cátodo. Esta técnica, estudiada en el Capítulo 2 desde sus fundamentos electroquímicos, permite mejorar la resistencia a la corrosión, la conductividad superficial o la apariencia de un objeto, y puede reproducirse en el aula con fuentes de baja tensión y disoluciones diluidas.

3.2.3. Combinación de componentes con propiedades complementarias

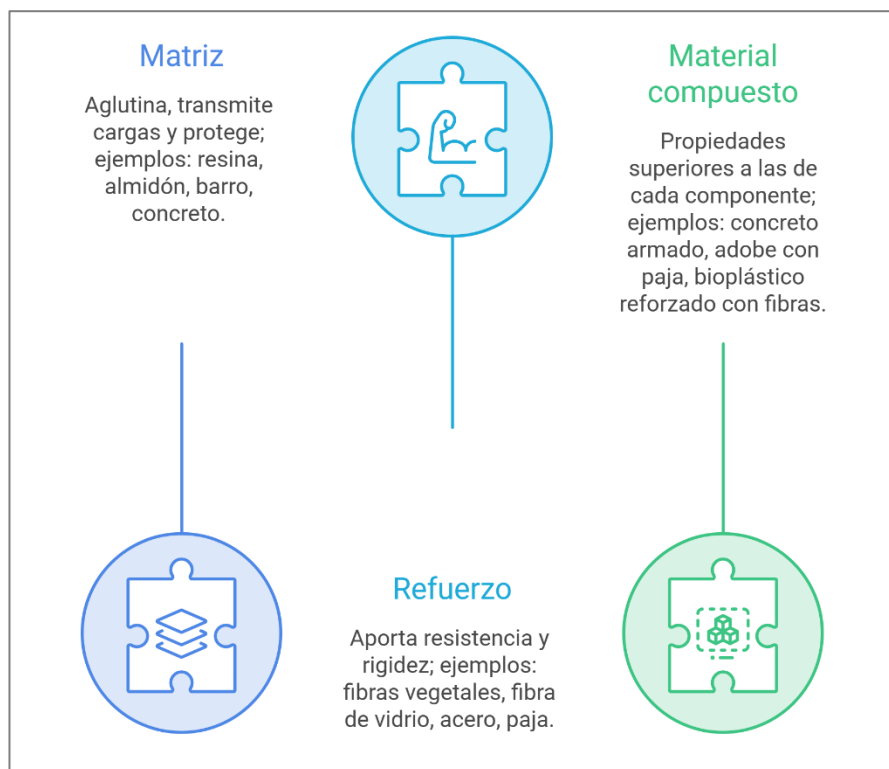
Los materiales compuestos combinan dos o más componentes con propiedades distintas para obtener un material cuyo desempeño supera al de cada componente por separado. Generalmente, un compuesto consta de una matriz continua que aglutina el conjunto y transmite las cargas, y de un refuerzo disperso que aporta resistencia o rigidez. El concreto armado combina la resistencia a la compresión del concreto con la resistencia a la tracción del acero; la fibra de vidrio une la rigidez de las fibras con la tenacidad y la ligereza de una resina polimérica (Callister y Rethwisch, 2022).

Los compuestos no son una invención reciente. El adobe reforzado con paja, empleado durante siglos en la arquitectura andina, reúne la resistencia a la compresión de la tierra con la resistencia a la tracción de las fibras vegetales, que reducen el agrietamiento durante el secado. El bahareque, técnica constructiva tradicional en Ecuador, combina una estructura de caña o madera con un relleno de barro. Estas técnicas demuestran que la lógica de los materiales compuestos puede aplicarse con recursos locales y conocimientos transmitidos culturalmente.

En los proyectos escolares, la elaboración de compuestos ofrece amplias posibilidades de experimentación. Es posible reforzar bioplásticos de almidón con fibras vegetales, preparar tableros con residuos de papel y aglutinantes naturales, o fabricar bloques de tierra

con distintas proporciones de fibra. Purba et al. (2024) encontraron que la adición de quitosano a bioplásticos de almidón de semilla de jaca incrementó su resistencia a la tracción y su elongación. La Figura 10 representa la combinación de componentes con propiedades complementarias y la sinergia resultante.

Figura 10. *Combinación de componentes con propiedades complementarias*



Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022) y Purba et al. (2024).

La figura destaca la complementariedad de funciones entre matriz y refuerzo: la matriz mantiene unidos los componentes y distribuye las cargas, mientras que el refuerzo soporta la mayor parte del esfuerzo. El desempeño del compuesto depende no solo de las propiedades de

cada componente, sino también de la adherencia entre ellos, de la proporción y orientación del refuerzo y del procesamiento. Los ejemplos incluidos, que van desde la ingeniería moderna hasta la construcción tradicional y los bioplásticos, muestran la versatilidad del principio y su aplicabilidad a proyectos con materiales accesibles.

3.2.4. Protección frente al deterioro

El deterioro de los materiales reduce la vida útil de los objetos y genera costos de mantenimiento, reposición y disposición de residuos. Las estrategias de protección pueden clasificarse según su mecanismo en barreras físicas, que aíslan el material del agente agresivo; protecciones electroquímicas, que modifican las reacciones de corrosión; e inhibidores, que interfieren con los mecanismos de degradación. La selección de la estrategia depende del material que se desea proteger, del agente causante del deterioro y de las condiciones de exposición (Callister y Rethwisch, 2022).

Las barreras físicas incluyen pinturas, barnices, aceites, recubrimientos plásticos y capas metálicas. Su eficacia depende de la adherencia al sustrato, de la impermeabilidad al agua y al oxígeno, y de la integridad de la capa, porque cualquier fisura puede concentrar el ataque. La protección catódica, en cambio, convierte el metal que se desea proteger en el cátodo de una celda electroquímica, ya sea conectándolo con un metal más activo que se corroe en su lugar, llamado ánodo de sacrificio, o aplicando una corriente externa (Overby y Chang, 2022).

En los materiales poliméricos y orgánicos, la protección frente al deterioro incluye la incorporación de estabilizadores ultravioleta, antioxidantes y fungicidas. Los plásticos expuestos al sol se degradan menos cuando contienen pigmentos como el negro de humo, que absorben la radiación, y la madera se conserva mejor cuando se trata con sustancias que impiden el ataque de hongos e insectos. En todos

los casos, la protección debe considerar el efecto ambiental de los productos empleados, prefiriendo aquellos de menor toxicidad y persistencia en el ambiente.

3.2.5. Mejora funcional a partir de cambios controlados

La mejora funcional de un material consiste en introducir cambios controlados que incrementen su desempeño en una función determinada. El control implica que la modificación se realiza de manera deliberada, con variables definidas y resultados medibles, y que su efecto se verifica mediante ensayos comparativos con el material original. Este enfoque permite optimizar gradualmente un material hasta que satisfaga los requerimientos de la aplicación, en lugar de buscar un material nuevo cada vez que el existente resulta insuficiente (Callister y Rethwisch, 2022).

Los cambios controlados pueden afectar la composición, mediante la adición de componentes en proporciones definidas; la estructura, mediante tratamientos térmicos o mecánicos; o la superficie, mediante recubrimientos o procesos químicos. En los bioplásticos, por ejemplo, la proporción de glicerina actúa como variable de control de la flexibilidad: una cantidad mayor produce películas más flexibles pero menos resistentes. Purba et al. (2024) documentaron también que las formulaciones de bioplástico estudiadas se biodegradaron con rapidez, con una pérdida de masa cercana al 94 % en cinco días, propiedad que depende igualmente de la composición.

El registro sistemático de las modificaciones y de sus efectos convierte la mejora funcional en un proceso de investigación. El estudiante formula una hipótesis sobre cómo afectará un cambio a una propiedad, diseña el ensayo, mide el resultado y ajusta la modificación. La Tabla 12 presenta ejemplos de modificaciones controladas y de las mejoras funcionales que producen en distintos materiales, y puede utilizarse como repertorio de ideas para proyectos experimentales orientados a

la innovación, en particular aquellos que buscan dar nuevo valor a materiales abundantes o descartados en la localidad.

Tabla 12. *Modificaciones controladas y mejoras funcionales en materiales*

Material	Modificación controlada	Mejora funcional
Acero	Temple y revenido	Mayor dureza con tenacidad aceptable
Cobre	Recocido tras el trabajo en frío	Recuperación de la ductilidad para seguir conformando
Aluminio	Anodizado	Mayor resistencia a la corrosión y al desgaste
Carbón vegetal	Activación química y térmica	Mayor porosidad y capacidad adsorbente
Bioplástico de almidón	Ajuste de glicerina o adición de quitosano	Control de flexibilidad y resistencia a la tracción
Bloque de tierra	Adición de fibras vegetales	Menor agrietamiento y mayor resistencia a la tracción
Madera	Tratamiento hidrofóbico	Menor absorción de agua y mayor durabilidad

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022), Décima (2024) y Purba et al. (2024).

La tabla muestra que la mejora funcional puede lograrse en materiales de naturaleza muy distinta, desde metales hasta residuos orgánicos, mediante modificaciones que actúan sobre la composición, la estructura o la superficie. Varias de ellas, como la activación del carbón, la plastificación del almidón o el refuerzo de bloques de tierra, resultan accesibles para proyectos escolares y utilizan materiales de bajo costo. Otras, como el temple del acero o el anodizado, requieren condiciones más controladas y pueden abordarse mediante demostraciones supervisadas o visitas a talleres. En todas, la mejora debe demostrarse con datos y no solo con apreciaciones cualitativas.

3.3. Aprovechamiento eficiente de recursos energéticos

La energía constituye un recurso limitado cuya obtención y uso generan impactos económicos y ambientales considerables. Aprovecharla de manera eficiente implica seleccionar las conversiones más adecuadas, reducir las pérdidas, almacenar la energía disponible para utilizarla cuando se necesite y recuperar la que de otro modo se desperdiciaría. Esta sección examina estos aspectos desde los principios físico-químicos y propone criterios para valorar la eficiencia energética de las propuestas STEAM, en coherencia con el análisis termodinámico presentado en los capítulos anteriores (Çengel et al., 2024).

3.3.1. Conversión entre distintas formas de energía

Las formas de energía de interés tecnológico incluyen la mecánica, la térmica, la eléctrica, la química, la radiante y la nuclear. Los dispositivos que transforman una forma en otra presentan eficiencias muy diversas: los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en mecánica con eficiencias elevadas, mientras que los motores de combustión interna aprovechan una fracción mucho menor de la energía química del combustible. Çengel et al. (2024) explican que la eficiencia de las máquinas térmicas está limitada por la segunda ley de la termodinámica, límite que no afecta de la misma manera a otras conversiones.

El límite de Carnot establece que la eficiencia máxima de una máquina térmica depende exclusivamente de las temperaturas de la fuente caliente y del sumidero frío entre las que opera. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura, mayor será la eficiencia máxima teórica. Este principio explica por qué las centrales térmicas buscan operar a temperaturas elevadas y por qué los dispositivos que funcionan con pequeñas diferencias de temperatura, como los generadores

termoeléctricos, presentan eficiencias bajas, aunque puedan resultar útiles para aprovechar calor residual.

Las conversiones que no involucran calor como etapa intermedia pueden alcanzar eficiencias superiores. Las celdas electroquímicas convierten la energía química en eléctrica sin pasar por la combustión, y su eficiencia máxima está determinada por la relación entre la energía libre de Gibbs y la entalpía de la reacción (Atkins et al., 2023). Los paneles fotovoltaicos transforman directamente la radiación en electricidad. Elegir la conversión adecuada para cada aplicación, considerando la fuente disponible y la forma de energía requerida, constituye el primer paso hacia un aprovechamiento eficiente.

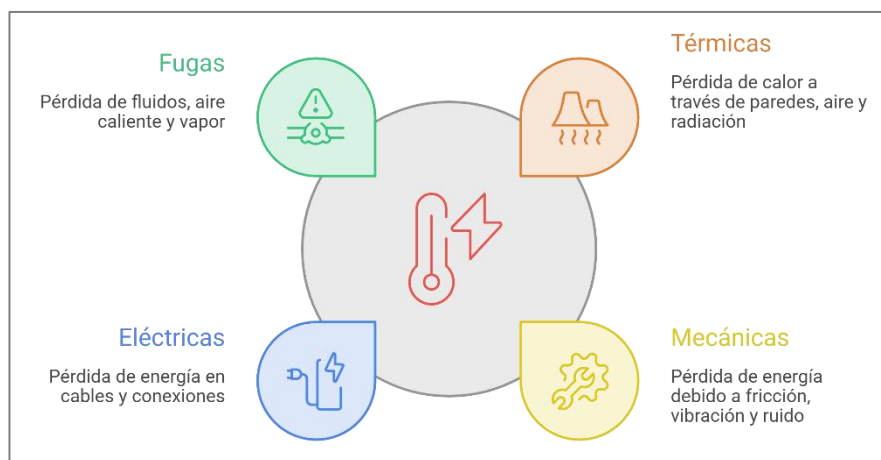
3.3.2. Reducción de pérdidas en sistemas sencillos

En los sistemas reales, una parte de la energía se pierde en cada etapa de conversión, transporte y uso. Las pérdidas más frecuentes en sistemas sencillos son las térmicas, por conducción, convección y radiación hacia el entorno; las mecánicas, por fricción entre superficies en movimiento; las eléctricas, por efecto Joule en conductores y conexiones; y las debidas a fugas de fluidos. Identificar cuál de ellas predomina en un sistema concreto permite concentrar los esfuerzos de mejora donde el beneficio será mayor (Çengel et al., 2024).

Cada tipo de pérdida admite estrategias de reducción específicas. Las térmicas se reducen mediante aislamiento, cierre de aberturas, superficies reflectantes y reducción del área expuesta; las mecánicas, mediante lubricación, rodamientos y alineación de piezas; las eléctricas, mediante conductores de mayor sección, conexiones firmes y reducción de la longitud de los cables; y las debidas a fugas, mediante sellos y juntas adecuados. Muchas de estas medidas son sencillas y económicas, lo que las vuelve especialmente apropiadas para proyectos escolares y comunitarios.

La identificación de pérdidas puede realizarse mediante mediciones comparativas. Una cámara termográfica, si está disponible, revela visualmente las zonas por donde escapa el calor; en su ausencia, termómetros colocados en distintos puntos permiten construir un mapa aproximado. La medición del consumo eléctrico antes y después de una mejora cuantifica su efecto. La Figura 11 presenta las principales fuentes de pérdida energética en sistemas sencillos y sirve como lista de verificación para diagnosticar y mejorar los prototipos construidos por los estudiantes.

Figura 11. Principales fuentes de pérdida energética en sistemas sencillos



Nota. Elaborada a partir de Çengel et al. (2024).

La figura organiza las pérdidas según su naturaleza física y asocia cada una con estrategias de reducción, lo que facilita un diagnóstico sistemático. Esta organización evita que las mejoras se realicen al azar y orienta al estudiante hacia la pérdida dominante, cuya reducción produce el mayor beneficio. La figura permite, además, relacionar el análisis energético con los conocimientos adquiridos sobre transferencia de calor, fricción y conducción eléctrica, integrando contenidos que suelen enseñarse por separado. Su uso como lista de

verificación resulta particularmente útil en las etapas de ajuste y optimización que se desarrollan en el Capítulo 4.

3.3.3. Almacenamiento energético mediante principios físico-químicos

El almacenamiento de energía permite desacoplar el momento de su obtención del momento de su uso, condición indispensable para aprovechar fuentes intermitentes como la solar o la eólica. Los principios físico-químicos ofrecen diversas opciones: el almacenamiento electroquímico en baterías, el térmico mediante calor sensible o latente, el mecánico mediante la elevación de masas o la compresión de gases, y el químico mediante la producción de combustibles como el hidrógeno. Cada opción presenta ventajas y limitaciones en términos de densidad energética, eficiencia, costo y durabilidad (Atkins et al., 2023).

El almacenamiento térmico por calor sensible aprovecha la capacidad calorífica de materiales como el agua, las rocas o el concreto, que se calientan cuando hay energía disponible y la liberan al enfriarse. El almacenamiento por calor latente emplea materiales de cambio de fase, como las parafinas o las sales hidratadas, que almacenan mayor cantidad de energía por unidad de masa y la liberan a temperatura prácticamente constante. Çengel et al. (2024) describen ambos mecanismos y sus aplicaciones en sistemas de climatización y en el aprovechamiento de la energía solar.

En los proyectos escolares, el almacenamiento térmico resulta más accesible que el electroquímico o el químico. Es posible comparar la capacidad de almacenamiento de recipientes llenos de agua, arena o piedras expuestos al sol, midiendo la temperatura durante la noche; o evaluar el efecto de la parafina en la estabilización térmica de un recipiente. Estas experiencias permiten calcular la energía almacenada a partir de la masa, la capacidad calorífica y la variación

de temperatura, e integran la física con la matemática y el diseño de dispositivos.

3.3.4. Recuperación de energía en procesos cotidianos

Numerosos procesos cotidianos desperdician energía que podría recuperarse y aprovecharse. El calor de los gases de escape de una cocina, el agua caliente que se descarta tras la ducha, la energía cinética de un vehículo al frenar o el calor residual de los refrigeradores constituyen fuentes de energía residual. La recuperación consiste en capturar parte de esa energía y destinarla a un uso útil, reduciendo así el consumo de energía primaria y los impactos asociados a su producción (Çengel et al., 2024).

Los intercambiadores de calor constituyen la tecnología más difundida para recuperar energía térmica: permiten que un fluido caliente que se desecha precaliente otro fluido que se va a utilizar, sin que ambos se mezclen. El frenado regenerativo de los vehículos eléctricos convierte la energía cinética en eléctrica y la almacena en la batería. La producción de biogás a partir de residuos orgánicos recupera la energía química contenida en la biomasa que de otro modo se descompondría liberando metano a la atmósfera, un gas con elevado potencial de calentamiento.

Los proyectos de recuperación de energía resultan formativos porque obligan a identificar flujos energéticos que suelen pasar desapercibidos. Un intercambiador sencillo, construido con un tubo de cobre enrollado alrededor de la chimenea de una cocina, puede precalentar agua; un recipiente que aprovecha el calor residual de una olla recién retirada del fuego puede mantener caliente otro alimento. La medición de la energía recuperada, comparada con la energía total disponible, permite calcular la eficiencia de recuperación y valorar la conveniencia de la propuesta.

3.3.5. Criterios de eficiencia aplicados a propuestas STEAM

Valorar la eficiencia energética de una propuesta STEAM requiere criterios explícitos y medibles. La eficiencia de conversión expresa la fracción de la energía suministrada que se transforma en energía útil; la tasa de pérdidas identifica la magnitud de la energía disipada; la energía incorporada estima la energía consumida en la fabricación de los materiales del dispositivo; y el tiempo de retorno energético indica cuánto tarda el dispositivo en ahorrar la energía invertida en su construcción. Ashby (2021) considera la energía incorporada como un indicador clave para comparar el impacto de distintos materiales.

Estos criterios deben aplicarse de manera integrada, porque un dispositivo muy eficiente en su operación puede resultar poco conveniente si su fabricación consume una cantidad excesiva de energía o si su vida útil es corta. Una cocina solar construida con aluminio virgen, por ejemplo, incorpora una cantidad de energía considerable en su material reflectante, mientras que una fabricada con cartón y papel de aluminio reciclado presenta una energía incorporada menor, aunque su durabilidad también sea inferior. La comparación exige, por tanto, considerar el ciclo de vida completo.

La aplicación de estos criterios en el aula favorece el desarrollo del pensamiento sistémico y de la capacidad para argumentar decisiones con datos. Las revisiones sobre educación STEAM en las aulas de ciencias destacan el valor de las propuestas que vinculan los contenidos científicos con problemas reales y con la evaluación de soluciones (Yulianti et al., 2024). La Tabla 13 presenta los criterios para valorar la eficiencia energética en propuestas STEAM, junto con la forma de estimarlos en contextos escolares.

Tabla 13. *Criterios para valorar la eficiencia energética en propuestas STEAM*

Criterio	Definición	Estimación en contextos escolares
Eficiencia de conversión	Fracción de la energía suministrada convertida en energía útil	Cociente entre energía útil medida y energía suministrada
Tasa de pérdidas	Proporción de energía disipada en el entorno	Diferencia entre energía suministrada y útil, expresada en porcentaje
Energía incorporada	Energía consumida en la producción de los materiales	Consulta de valores de referencia por kilogramo de material
Tiempo de retorno energético	Tiempo necesario para ahorrar la energía invertida en la fabricación	Cociente entre energía incorporada y ahorro energético diario
Durabilidad	Vida útil esperada del dispositivo	Ensayos de uso repetido y observación del deterioro

Nota. Elaborada a partir de Ashby (2021) y Çengel et al. (2024).

La tabla amplía la noción de eficiencia más allá de la operación del dispositivo, incorporando la energía invertida en su fabricación y su durabilidad. Esta ampliación corrige una limitación frecuente en los proyectos escolares, que suelen evaluar únicamente el desempeño durante el uso. El tiempo de retorno energético resulta especialmente ilustrativo, porque integra en un solo indicador la energía incorporada y el ahorro obtenido, y permite comparar propuestas de manera sencilla. Su cálculo exige operaciones matemáticas básicas y la consulta de datos de referencia, lo que refuerza la integración disciplinar propia del enfoque STEAM.

3.4. Recuperación y transformación de recursos

Los residuos domésticos, agrícolas e industriales contienen materiales que pueden recuperarse y transformarse en productos útiles, reduciendo la extracción de materias primas y la carga sobre los rellenos sanitarios. Esta perspectiva, asociada con la economía circular, concibe los residuos como recursos que conservan valor. Kirchherr et al. (2023), tras analizar 221 definiciones de economía circular, encontraron que el desarrollo sostenible aparece cada vez más como su finalidad principal. Esta sección examina la caracterización de materiales descartados, la separación de componentes, su transformación física y química, y su reincorporación a nuevos ciclos.

3.4.1. Caracterización de materiales descartados

Antes de recuperar un residuo es necesario conocer su composición y sus propiedades. La caracterización incluye la identificación de los materiales que lo componen, la estimación de sus proporciones, la determinación de su contenido de humedad, la detección de contaminantes y la medición de propiedades físicas relevantes como la densidad o el tamaño de partícula. Esta información permite decidir si el residuo puede recuperarse, qué procesos requiere y qué productos pueden obtenerse de él, evitando esfuerzos en materiales cuya recuperación resulta inviable (Ashby, 2021).

La identificación de los plásticos constituye un ejemplo instructivo de caracterización. Los códigos numéricos impresos en los envases indican el tipo de polímero, pero cuando faltan es posible distinguirlos mediante pruebas de densidad por flotación en agua o en disoluciones salinas, y mediante la observación de su comportamiento al calentarse. El polietileno y el polipropileno flotan en agua, mientras que el tereftalato de polietileno y el policloruro de vinilo se hunden. Esta clasificación resulta indispensable, porque la mezcla de polímeros

distintos degrada la calidad del material reciclado (Callister y Rethwisch, 2022).

En los residuos orgánicos agrícolas, la caracterización incluye la determinación del contenido de humedad, cenizas, celulosa y lignina, que condicionan su aprovechamiento como combustible, adsorbente, fibra de refuerzo o sustrato para compostaje. La cascarilla de arroz, por ejemplo, contiene una proporción elevada de sílice, que le confiere resistencia a la degradación y la hace útil en materiales de construcción. En el aula, la determinación de la humedad por secado y pesada, y del contenido de cenizas por calcinación, constituyen análisis sencillos que aportan información valiosa.

3.4.2. Separación de componentes aprovechables

Los residuos suelen ser mezclas complejas cuyos componentes deben separarse antes de su aprovechamiento. Los métodos de separación se basan en diferencias de propiedades físicas, al igual que los estudiados en el Capítulo 2 para mezclas líquidas. La separación magnética extrae los metales ferrosos; la flotación separa materiales según su densidad; el tamizado clasifica partículas por tamaño; y las corrientes de Foucault permiten separar metales no ferrosos, como el aluminio, al inducir en ellos corrientes que los repelen de un campo magnético variable (Callister y Rethwisch, 2022).

La separación en la fuente, realizada por los propios usuarios al depositar los residuos en recipientes diferenciados, constituye la estrategia más eficaz y económica, porque evita la contaminación cruzada entre materiales y simplifica los procesos posteriores. La participación de la comunidad resulta, por tanto, decisiva para el éxito de cualquier sistema de recuperación. Los proyectos escolares que diseñan y promueven sistemas de separación en la fuente integran la dimensión técnica con la comunicación y la educación ambiental, y pueden generar efectos visibles en el entorno inmediato.

En los proyectos experimentales, la separación de componentes puede estudiarse con residuos reales de la institución educativa. Un ejercicio de caracterización y separación de los residuos generados durante una semana permite cuantificar la proporción de cada material, identificar los que pueden recuperarse y estimar el volumen que dejaría de enviarse al relleno sanitario. Estos datos, representados gráficamente, constituyen una base sólida para proponer mejoras y para comunicar a la comunidad educativa el potencial de la recuperación de materiales y los beneficios económicos que podría generar su comercialización o reutilización interna.

3.4.3. Transformación de residuos mediante procesos físicos

Los procesos físicos de transformación modifican la forma, el tamaño o el estado de los residuos sin alterar su composición química, y permiten convertirlos en materias primas o productos. La trituration reduce el tamaño de las partículas y facilita su manipulación y procesamiento posterior; la compactación disminuye el volumen de materiales como el papel o las latas; la fusión y el moldeo permiten reformar termoplásticos y metales; y el prensado de fibras produce tableros y aglomerados. Cada proceso requiere condiciones específicas de temperatura, presión y tiempo (Callister y Rethwisch, 2022).

El reciclaje mecánico de plásticos ilustra las posibilidades y los límites de la transformación física. Los termoplásticos, como el polietileno o el polipropileno, pueden fundirse y moldearse repetidamente porque sus cadenas no están unidas por enlaces covalentes entre sí; sin embargo, cada ciclo de fusión degrada parcialmente las cadenas y reduce la calidad del material. Los termoestables, en cambio, no pueden fundirse sin descomponerse y solo pueden reciclarse mecánicamente mediante trituration para su uso como relleno. Esta diferencia estructural condiciona el destino de cada residuo plástico y debe considerarse al diseñar productos.

El reciclaje de papel constituye otro proceso físico accesible para proyectos escolares. El papel usado se desintegra en agua para formar una pulpa, que se filtra sobre una malla, se prensa y se seca para producir hojas nuevas. La incorporación de fibras vegetales, semillas o pigmentos naturales permite obtener papeles con propiedades y apariencias distintas, lo que añade una dimensión artística al proyecto. Las fibras de celulosa se acortan en cada ciclo de reciclaje, lo que limita el número de veces que el papel puede reciclarse con calidad aceptable.

3.4.4. Conversión química para obtener nuevos productos

La conversión química transforma los residuos en sustancias distintas mediante reacciones que modifican su composición. Estos procesos permiten aprovechar materiales que no pueden recuperarse por medios físicos, o bien obtener productos de mayor valor. La saponificación del aceite de cocina usado produce jabón; la pirólisis de biomasa en ausencia de oxígeno genera carbón, gases combustibles y líquidos; la hidrólisis de materiales celulósicos libera azúcares fermentables; y la extracción de almidón de residuos vegetales proporciona la materia prima de bioplásticos (Overby y Chang, 2022).

La obtención de bioplásticos a partir de residuos agrícolas constituye una línea de trabajo con creciente interés educativo. Purba et al. (2024) elaboraron bioplásticos con almidón extraído de semillas de jaca, un residuo frutícola, y concluyeron, a partir de la consulta a 40 estudiantes, que el tema presenta potencial para integrarse en propuestas de educación para el desarrollo sostenible basadas en proyectos. En el contexto ecuatoriano, las cáscaras de banano, los residuos de yuca y las cáscaras de papa ofrecen fuentes de almidón igualmente accesibles.

La carbonización de residuos orgánicos, como las cáscaras de coco, los huesos de fruta o la cascarilla de arroz, produce un carbón que

puede activarse para obtener un adsorbente eficaz, según se describió en la sección 3.2.2. Este proceso combina una transformación química, la descomposición térmica de la biomasa, con una modificación estructural que incrementa la porosidad. La conversión química de residuos exige atención a la seguridad, porque algunos procesos generan gases o requieren temperaturas elevadas, y debe planificarse con los controles adecuados en cada caso.

3.4.5. Reincorporación de materiales a nuevos ciclos de uso

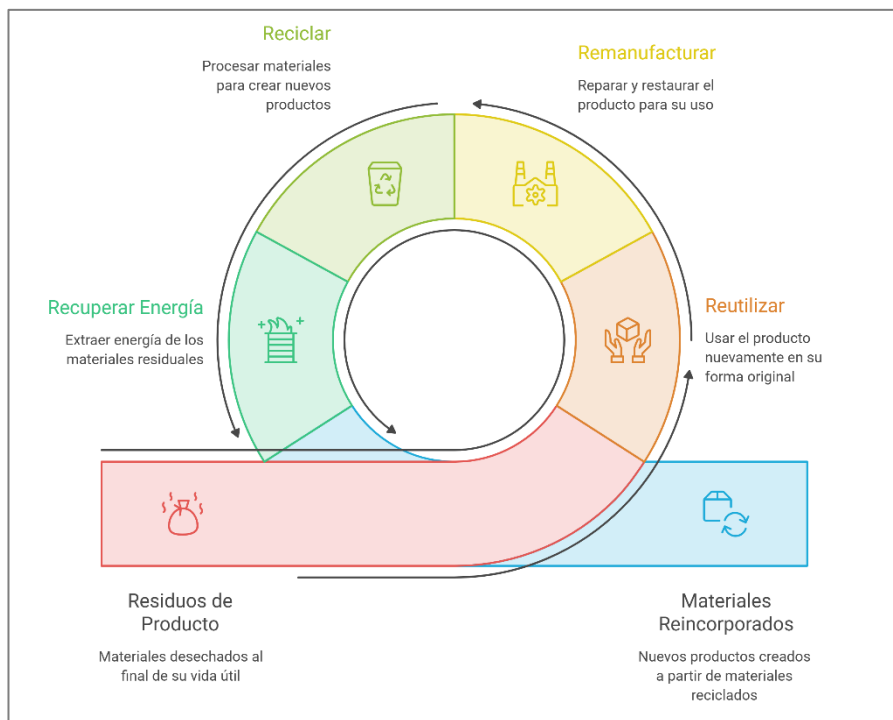
La reincorporación de materiales recuperados a nuevos ciclos de uso cierra el circuito de la economía circular y constituye su objetivo último. Esta reincorporación puede realizarse en distintos niveles: la reutilización del objeto en su función original o en otra; la remanufactura, que restaura un producto a condiciones equivalentes a las de uno nuevo; el reciclaje, que recupera el material para fabricar nuevos productos; y la recuperación energética, que aprovecha la energía contenida en el material cuando no es posible recuperarlo de otra manera (Ashby, 2021).

Estos niveles no son equivalentes desde el punto de vista ambiental. La reutilización conserva el mayor valor del objeto, porque evita la energía y los materiales necesarios para su transformación; el reciclaje conserva el valor del material, pero exige procesos que consumen energía; y la recuperación energética solo aprovecha el contenido energético, perdiendo el valor material. Kirchherr et al. (2023) destacan que las definiciones de economía circular se articulan en torno a estrategias de este tipo, lo que ofrece una jerarquía útil para orientar las decisiones de diseño.

El diseño para la reincorporación considera desde el inicio cómo se recuperarán los materiales al final de la vida útil del producto. Los productos fáciles de desmontar, fabricados con pocos materiales distintos y sin uniones permanentes entre materiales incompatibles,

facilitan su recuperación. La Figura 12 representa el ciclo de recuperación, transformación y reincorporación de materiales, y sintetiza los contenidos de esta sección en un esquema que puede aplicarse al análisis de cualquier producto o proyecto experimental, desde un envase doméstico hasta los prototipos elaborados en el laboratorio escolar.

Figura 12. *Ciclo de recuperación, transformación y reincorporación de materiales*



Nota. Elaborada a partir de Ashby (2021) y Kirchherr et al. (2023).

La figura representa la circularidad como una secuencia de etapas que devuelve los materiales al uso en lugar de conducirlos a la disposición final. La jerarquía situada en el centro recuerda que no todas las formas de reincorporación son equivalentes y que conviene privilegiar aquellas

que conservan mayor valor. La salida hacia la disposición final, representada como mínima, reconoce que ningún sistema real es completamente circular. Esta representación permite al estudiante analizar críticamente los productos que utiliza y proponer mejoras orientadas a prolongar su vida útil o facilitar su recuperación.

3.5. Sostenibilidad en procesos de innovación

La sostenibilidad exige que la satisfacción de las necesidades actuales no comprometa la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. En el ámbito de la innovación tecnológica, este principio se traduce en criterios concretos: uso responsable de materias primas, reducción del consumo de agua y energía, prevención de residuos, diseño de productos duraderos y equilibrio entre funcionalidad e impacto ambiental. Esta sección examina estos criterios y propone herramientas para incorporarlos a los proyectos experimentales desde su concepción (Ashby, 2021; Kirchherr et al., 2023).

3.5.1. Uso responsable de materias primas

Las materias primas provienen de recursos naturales renovables, como la madera o las fibras vegetales, y no renovables, como los minerales metálicos o el petróleo. El uso responsable implica reducir la cantidad de material empleado, preferir materiales renovables cuando su desempeño lo permita, utilizar materiales recuperados y evitar aquellos cuya extracción genera impactos ambientales o sociales graves. Ashby (2021) describe la creciente dependencia de la sociedad respecto de los materiales y analiza los factores que impulsan su consumo, entre ellos el crecimiento de la población y del consumo per cápita.

La eficiencia material, entendida como la obtención de la misma función con menos material, constituye una estrategia clave. Puede

lograrse mediante un diseño que optimice la geometría de las piezas, la selección de materiales con mejores índices de desempeño o la prolongación de la vida útil de los productos. Una viga en forma de I, por ejemplo, alcanza una rigidez comparable a la de una viga maciza con mucho menos material, porque concentra la masa lejos del eje neutro, donde contribuye más a resistir la flexión.

En los proyectos escolares, el uso responsable de materias primas se concreta en decisiones como emplear materiales recuperados, dimensionar los prototipos para minimizar el desperdicio, planificar los cortes para aprovechar al máximo las láminas y preferir materiales locales que reduzcan el transporte. El registro de la cantidad y el origen de los materiales empleados en cada proyecto permite evaluar su huella material y comparar alternativas, integrando la sostenibilidad como criterio de evaluación junto con el desempeño técnico, y convierte la elección de materiales en una decisión que el estudiante debe justificar con datos.

3.5.2. Reducción del consumo de agua y energía

Los procesos de fabricación, uso y disposición de los productos consumen agua y energía en cantidades que a menudo pasan inadvertidas. La producción de metales, cemento y plásticos requiere cantidades considerables de energía, y numerosos procesos químicos emplean agua como disolvente, medio de reacción o refrigerante. Reducir estos consumos disminuye los costos y los impactos ambientales asociados, entre ellos las emisiones de gases de efecto invernadero y la presión sobre las fuentes hídricas (Ashby, 2021). Este último aspecto resulta sensible en la región andina, donde el abastecimiento de agua depende en buena medida de páramos y glaciares vulnerables.

Las estrategias para reducir el consumo de agua incluyen la reutilización del agua de enjuague, la recirculación en sistemas de

refrigeración, el uso de procesos en seco cuando es posible y la captación de agua lluvia para usos que no requieren calidad potable. En cuanto a la energía, las estrategias comprenden la selección de procesos a menor temperatura, el aprovechamiento de fuentes renovables, la recuperación de calor residual y la eliminación de etapas innecesarias. Estas estrategias pueden aplicarse tanto en la industria como en el laboratorio escolar.

En el trabajo experimental, la conciencia sobre el consumo de agua y energía se desarrolla midiendo y registrando estas magnitudes en cada proyecto. Un protocolo que incluya la cuantificación del agua utilizada en los ensayos y de la energía consumida por los equipos de calentamiento permite identificar oportunidades de ahorro y comparar procedimientos alternativos. Esta práctica transforma la sostenibilidad en un aspecto medible del proyecto y contribuye a formar hábitos que el estudiante puede trasladar a su vida cotidiana y a su futura actividad profesional.

3.5.3. Prevención y disminución de residuos

La prevención de residuos constituye la estrategia más eficaz dentro de la gestión de materiales, porque evita los impactos asociados a la recolección, el tratamiento y la disposición. Prevenir implica diseñar productos y procesos que generen menos residuos desde el inicio, en lugar de gestionar los residuos después de producidos. La química verde incorpora este principio al proponer que es preferible evitar la formación de residuos antes que tratarlos o eliminarlos, y al promover reacciones en las que la mayor parte de los átomos de los reactivos se incorporen al producto deseado.

Las estrategias de prevención incluyen la reducción del envase, la sustitución de productos desechables por reutilizables, el diseño modular que permite reemplazar solo las piezas dañadas y la planificación precisa de las cantidades de reactivos en los procesos

químicos. En el laboratorio escolar, la microescala, que consiste en realizar los experimentos con cantidades reducidas de reactivos, disminuye la generación de residuos, los costos y los riesgos, sin afectar necesariamente el valor formativo de la experiencia, y facilita que cada estudiante realice sus propios ensayos en lugar de observar demostraciones.

Cuando los residuos no pueden evitarse, su disminución y su gestión adecuada adquieren prioridad. La separación de los residuos del laboratorio según su naturaleza, la neutralización de disoluciones ácidas o básicas antes de su descarga y la recuperación de metales de las disoluciones electroquímicas son prácticas que reducen el impacto ambiental del trabajo experimental. Incorporar estas prácticas a los protocolos de los proyectos enseña al estudiante que la responsabilidad sobre un proceso no termina con la obtención del producto, sino que se extiende a todo lo que el proceso genera y a su destino final en el ambiente.

3.5.4. Durabilidad como criterio de desarrollo

La durabilidad de un producto determina durante cuánto tiempo cumple su función antes de requerir reemplazo. Un producto duradero distribuye los impactos de su fabricación a lo largo de un período mayor, lo que reduce el impacto por unidad de tiempo de uso. Por esta razón, la durabilidad constituye un criterio de sostenibilidad tan importante como la selección de materiales de bajo impacto. Ashby (2021) señala que la prolongación de la vida útil de los productos forma parte de las estrategias de eficiencia material con mayor potencial para reducir el consumo de recursos.

La durabilidad depende de la resistencia de los materiales al deterioro, de la calidad del diseño y la fabricación, de la facilidad de mantenimiento y reparación, y de las condiciones de uso. Un diseño que permite reemplazar las piezas sometidas a mayor desgaste, o que

utiliza uniones desmontables en lugar de adhesivos permanentes, prolonga la vida útil del conjunto. La obsolescencia programada, en cambio, reduce deliberadamente la durabilidad para acelerar el reemplazo, práctica que contradice los principios de la sostenibilidad y que ha sido objeto de crítica creciente.

En los proyectos escolares, la durabilidad suele recibir menos atención que el funcionamiento inicial. Incorporarla como criterio de desarrollo implica someter los prototipos a ensayos de uso repetido, exposición a condiciones ambientales y envejecimiento acelerado, y registrar el deterioro observado. Un filtro de agua que funciona correctamente el primer día pero se colmata en una semana, o una cocina solar cuyo material reflectante se desprende con la lluvia, requieren mejoras que solo se identifican mediante la evaluación de la durabilidad.

3.5.5. Equilibrio entre funcionalidad e impacto ambiental

Toda solución tecnológica implica un compromiso entre su funcionalidad y su impacto ambiental. Los materiales de mejor desempeño técnico no siempre son los de menor impacto, y los materiales más sostenibles no siempre alcanzan el desempeño requerido. El equilibrio consiste en encontrar la solución que satisface los requerimientos funcionales con el menor impacto posible, o que ofrece el mejor desempeño dentro de un límite de impacto aceptable. Ashby (2021) propone las ecoauditorías como herramientas para estimar el impacto de un producto a lo largo de su ciclo de vida.

El análisis del ciclo de vida constituye la metodología más completa para evaluar el impacto ambiental de un producto, porque considera todas las etapas: extracción de materias primas, fabricación, transporte, uso y fin de vida. Este análisis permite identificar la etapa de mayor impacto y concentrar en ella los esfuerzos de mejora. En muchos productos que consumen energía durante su uso, como los

electrodomésticos, esa etapa domina el impacto total; en otros, como los envases, predominan la fabricación y la disposición final.

En los contextos escolares, el análisis del ciclo de vida puede simplificarse mediante matrices cualitativas que valoren cada etapa según criterios definidos. El currículo ecuatoriano vigente promueve un enfoque interdisciplinario que favorece este tipo de análisis integradores (Ministerio de Educación del Ecuador, 2021). La Tabla 14 presenta criterios para equilibrar funcionalidad e impacto ambiental, organizados de modo que puedan utilizarse en la evaluación y comparación de las propuestas desarrolladas por los estudiantes, tanto en la fase de diseño como en la valoración final de los prototipos construidos.

Tabla 14. *Criterios para equilibrar funcionalidad e impacto ambiental*

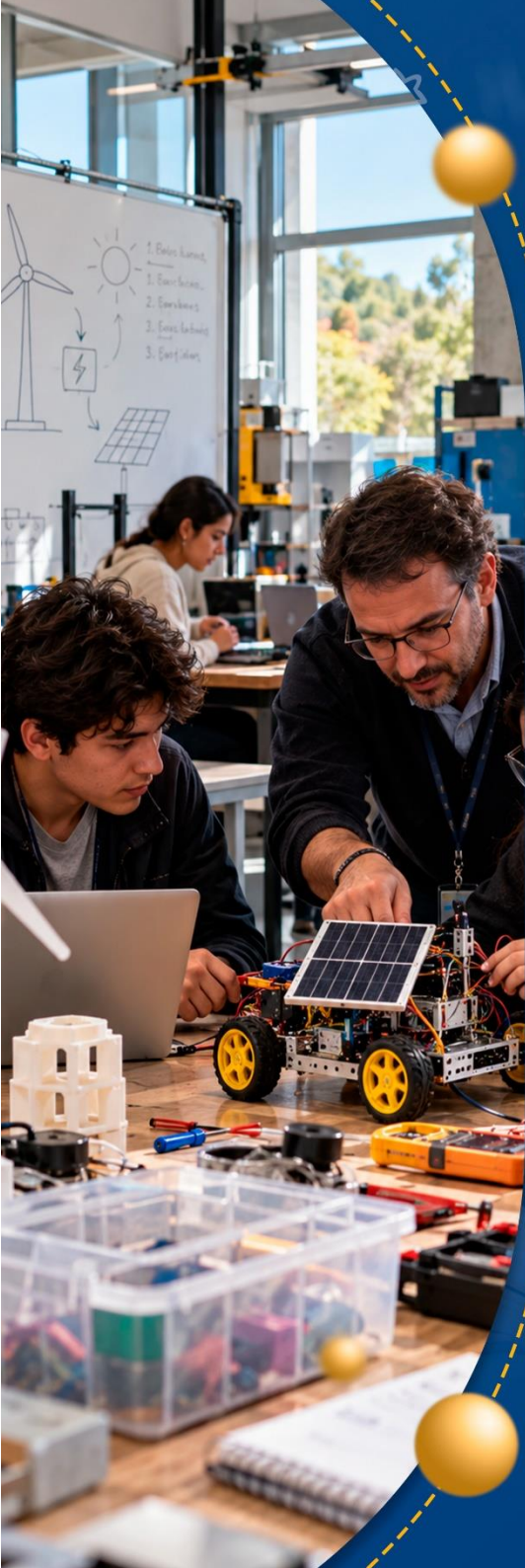
Criterio	Pregunta orientadora	Indicador sugerido
Desempeño funcional	¿Cumple la función con los requerimientos establecidos?	Resultados de los ensayos de funcionamiento
Materiales	¿Emplea materiales renovables, recuperados o de bajo impacto?	Proporción de materiales recuperados o renovables
Energía y agua	¿Cuánta energía y agua consume en su fabricación y uso?	Consumo medido o estimado por unidad
Residuos	¿Qué residuos genera y cómo se gestionan?	Masa de residuos generados y destino
Durabilidad	¿Cuánto tiempo mantiene su desempeño?	Número de ciclos de uso sin falla
Fin de vida	¿Puede reutilizarse, repararse o reciclarse?	Facilidad de desmontaje y separación

Nota. Elaborada a partir de Ashby (2021) y Kirchherr et al. (2023).

La tabla traduce el equilibrio entre funcionalidad e impacto en un conjunto de preguntas e indicadores que pueden aplicarse a cualquier propuesta. La inclusión del desempeño funcional como primer criterio recuerda que una solución sostenible pero ineficaz no resuelve el problema planteado, mientras que los criterios restantes aseguran que la eficacia no se obtenga a costa de impactos evitables. La aplicación de esta matriz a varias alternativas permite compararlas de manera argumentada y seleccionar la más equilibrada, una competencia que se desarrolla con mayor profundidad en el Capítulo 4, dedicado a la formulación, construcción y optimización de soluciones.

CAPÍTULO 4

Desarrollo y Optimización de Soluciones Experimentales STEAM



Capítulo 4. Desarrollo y Optimización de Soluciones Experimentales STEAM

Los capítulos anteriores reunieron los principios físico-químicos, las transformaciones de la materia y la energía, y los criterios para seleccionar y modificar materiales. Este capítulo se ocupa del proceso que integra esos conocimientos en una solución concreta: desde el reconocimiento de un problema en el entorno hasta la valoración de un prototipo optimizado. Dieter y Schmidt (2021) describen el diseño de ingeniería como un proceso estructurado que avanza desde la definición del problema y la identificación de necesidades, pasa por la generación y selección de conceptos, y culmina en el diseño de detalle, la evaluación del riesgo y la optimización.



El capítulo adapta ese proceso al trabajo experimental con enfoque STEAM en cinco etapas. La primera aborda la identificación y delimitación de problemas susceptibles de intervención; la segunda, la formulación y selección argumentada de alternativas; la tercera, la

construcción y la puesta a prueba del prototipo; la cuarta, el ajuste y la optimización de su desempeño; y la quinta, la valoración integral de la solución desarrollada. Ali y Tse (2023) analizaron las tendencias de la investigación sobre el proceso de diseño de ingeniería en la educación STEM escolar, lo que confirma el interés creciente por estructurar este tipo de experiencias en el aula.

4.1. Identificación de problemas susceptibles de intervención

Un proyecto experimental bien orientado comienza con un problema bien definido. La calidad de la solución depende en gran medida de la precisión con que se reconoce la necesidad, se delimita el problema desde la Física y la Química, se identifican sus causas, se establecen los requerimientos que debe cumplir la solución y se determina el alcance de la propuesta. Dieter y Schmidt (2021) advierten que los errores cometidos en la definición del problema son los más costosos de corregir, porque condicionan todas las decisiones posteriores. Esta sección desarrolla cada uno de estos pasos con orientaciones prácticas para el trabajo escolar.

4.1.1. Reconocimiento de necesidades del entorno

Las necesidades que dan origen a un proyecto experimental pueden identificarse mediante la observación del entorno, la conversación con los miembros de la comunidad, la revisión de datos disponibles y el análisis de situaciones cotidianas que generan molestias, costos o riesgos. El agua turbia en época de lluvias, el consumo excesivo de gas en la cocina, el deterioro de estructuras metálicas expuestas o la acumulación de residuos orgánicos en los mercados son ejemplos de situaciones que encierran necesidades susceptibles de intervención desde la Física y la Química.

El reconocimiento de una necesidad exige distinguirla de la solución que se imagina para ella. Una comunidad no necesita un filtro, sino

agua apta para su uso; un hogar no necesita un aislante, sino reducir el consumo de energía para cocinar. Esta distinción, que Dieter y Schmidt (2021) consideran central en la identificación de necesidades, evita que el proyecto se cierre prematuramente en una única solución y deja abierta la posibilidad de explorar alternativas diversas, algunas de las cuales pueden resultar más eficaces o económicas que la inicialmente imaginada.

Para el estudiante, el reconocimiento de necesidades constituye una oportunidad de vincular el conocimiento científico con la realidad de su comunidad. Las entrevistas a familiares, vecinos o comerciantes, las encuestas breves y la observación sistemática permiten recoger información sobre la magnitud y la frecuencia del problema. Las revisiones sobre educación STEAM destacan el valor de partir de problemas reales y significativos para el estudiantado (Yulianti et al., 2024), porque esta conexión incrementa el compromiso con el proyecto y otorga sentido al aprendizaje de los contenidos disciplinares.

4.1.2. Delimitación del problema desde la Física y la Química

Una vez reconocida la necesidad, el problema debe delimitarse en términos que permitan abordarlo con los conocimientos de la Física y la Química. Esta delimitación implica identificar los fenómenos implicados, las magnitudes que pueden medirse y las variables que pueden controlarse. El problema del agua turbia, por ejemplo, se delimita como un problema de separación de partículas en suspensión, en el que intervienen el tamaño de partícula, la densidad, la velocidad de sedimentación y la porosidad del medio filtrante, magnitudes estudiadas en el Capítulo 2.

La delimitación exige también decidir qué aspectos del problema quedan fuera del alcance del proyecto. Un filtro escolar puede reducir la turbidez y el color del agua, pero no garantiza por sí solo la

eliminación de microorganismos patógenos, para lo cual se requiere desinfección. Reconocer explícitamente estos límites resulta indispensable por razones éticas y de seguridad, porque evita que la comunidad confíe en una solución para funciones que no puede cumplir. La honestidad sobre los alcances forma parte de la responsabilidad científica que el proyecto debe cultivar.

La formulación final del problema debe expresarse como una pregunta o un enunciado que especifique qué se desea lograr, en qué condiciones y con qué criterios de éxito. Un enunciado como reducir la turbidez del agua de lluvia recolectada hasta un nivel en que resulte visualmente clara, empleando materiales disponibles en la comunidad, ofrece una guía mucho más útil que una intención genérica de purificar el agua. Esta precisión facilita la planificación de los ensayos y la valoración posterior de los resultados.

4.1.3. Identificación de causas y condiciones relacionadas

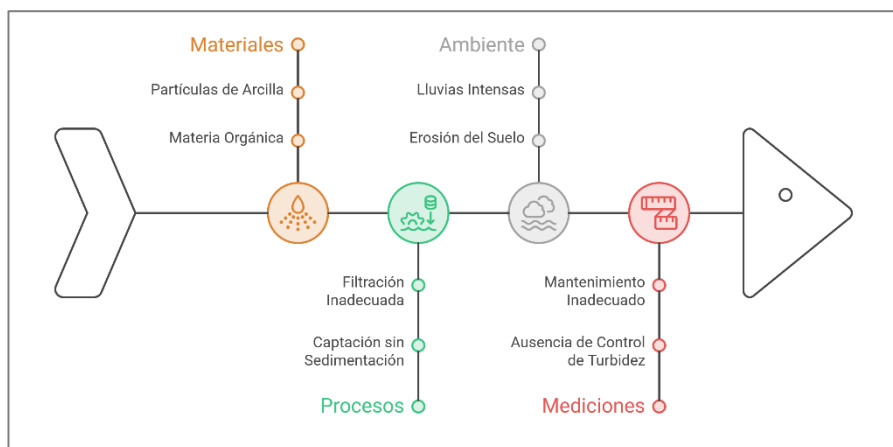
Todo problema tiene causas y se manifiesta en condiciones específicas. Identificarlas permite actuar sobre el origen del problema y no solo sobre sus síntomas. La corrosión de una estructura metálica, por ejemplo, puede deberse a la humedad, a la salinidad del ambiente, al contacto con metales distintos o a la ausencia de protección superficial, y cada causa sugiere una intervención diferente. Un análisis superficial que atribuya el problema a una sola causa puede conducir a soluciones ineficaces o que resuelvan solo una parte de la situación.

Las herramientas de análisis causal ayudan a organizar esta búsqueda. El diagrama de causa y efecto, también llamado diagrama de espina de pescado, agrupa las posibles causas en categorías como materiales, métodos, ambiente, mediciones y personas, y facilita que el equipo considere todas ellas antes de concentrarse en las más probables. La técnica de los cinco porqués, que consiste en preguntar repetidamente

por qué ocurre cada causa identificada, permite profundizar hasta encontrar causas raíz sobre las que resulta posible intervenir.

Las condiciones relacionadas con el problema incluyen factores del contexto que no son causas directas, pero que condicionan la solución: el clima, la disponibilidad de energía eléctrica, los recursos económicos de la comunidad, las costumbres de uso y las normas vigentes. La Figura 13 presenta un esquema para organizar las causas y condiciones asociadas con un problema, que el estudiante puede completar con la información recogida en la etapa de reconocimiento de necesidades y con los conocimientos físico-químicos pertinentes. Registrar estas condiciones desde el inicio evita diseñar soluciones que funcionen en el laboratorio pero resulten inaplicables en la comunidad.

Figura 13. Organización de causas y condiciones asociadas con un problema



Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021).

La figura organiza las causas en categorías que obligan a considerar el problema desde perspectivas complementarias, lo que reduce el riesgo de omitir factores relevantes. La franja de condiciones del contexto recuerda que la solución no se diseña en abstracto, sino para un lugar y una comunidad con características propias. El ejemplo del

agua turbia muestra cómo causas de naturaleza física, como la erosión y la presencia de arcilla, se combinan con causas relacionadas con los procesos y los hábitos. Esta visión integrada orienta hacia soluciones que actúan sobre varias causas de manera simultánea.

4.1.4. Establecimiento de requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales expresan lo que la solución debe hacer y con qué nivel de desempeño. Traducen la necesidad y el problema delimitado en especificaciones verificables, que servirán después como criterios para evaluar las alternativas y el prototipo. Dieter y Schmidt (2021) proponen reunir estos requerimientos en una especificación de diseño del producto, documento que se actualiza a lo largo del proyecto y que distingue entre requerimientos obligatorios, que la solución debe cumplir, y deseables, que mejoran su valoración pero no son imprescindibles.

Un buen requerimiento funcional es específico, medible y alcanzable. En lugar de establecer que un conservador térmico debe mantener los alimentos calientes, conviene especificar que debe mantener un litro de agua por encima de 60 °C durante al menos tres horas partiendo de 90 °C. Esta formulación permite diseñar un ensayo inequívoco para verificar su cumplimiento. Los requerimientos deben considerar también aspectos de seguridad, ergonomía, costo, durabilidad e impacto ambiental, además del desempeño técnico principal. Un requerimiento que no puede medirse tampoco puede verificarse, y deja la evaluación del prototipo a merced de apreciaciones subjetivas que dificultan cualquier comparación entre versiones.

La elaboración de los requerimientos debe involucrar, cuando sea posible, a los futuros usuarios de la solución, porque son ellos quienes conocen mejor las condiciones de uso y las características que valorarán. La Tabla 15 presenta los tipos de requerimientos funcionales que orientan una solución experimental, con ejemplos que ilustran

cómo formularlos de manera verificable. Esta tabla puede utilizarse como plantilla para elaborar la especificación de cualquier proyecto desarrollado a partir de los contenidos de este libro. Su participación temprana reduce el riesgo de desarrollar un prototipo técnicamente correcto que, sin embargo, no responde a la forma real en que se utilizará.

Tabla 15. *Requerimientos funcionales para orientar una solución experimental*

Tipo de requerimiento	Carácter	Ejemplo de formulación verificable
Desempeño principal	Obligatorio	Mantener 1 L de agua sobre 60 °C durante 3 horas desde 90 °C
Seguridad	Obligatorio	No presentar bordes cortantes ni materiales tóxicos en contacto con alimentos
Costo	Obligatorio o deseable	No superar un monto definido en materiales por unidad
Materiales	Deseable	Emplear al menos un 50 % de materiales recuperados o locales
Durabilidad	Deseable	Mantener el desempeño tras 30 ciclos de uso
Ergonomía y uso	Deseable	Permitir su manipulación por una persona sin herramientas
Impacto ambiental	Deseable	Poder desmontarse para separar y reciclar sus componentes

Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021) y Ashby (2021).

La tabla muestra que los requerimientos abarcan dimensiones técnicas, económicas, humanas y ambientales, y que cada uno puede formularse de modo que su cumplimiento se verifique con un ensayo o una observación concreta. La distinción entre requerimientos obligatorios y deseables resulta útil en la etapa de selección de

alternativas, porque las opciones que no cumplen los primeros se descartan de inmediato, mientras que los segundos permiten ordenar las restantes. Los valores numéricos incluidos son ilustrativos y deben ajustarse a cada proyecto según la necesidad identificada y las condiciones de la comunidad.

4.1.5. Determinación del alcance de la propuesta

El alcance define qué incluye y qué excluye el proyecto, considerando el tiempo, los recursos, los conocimientos y el equipamiento disponibles. Un alcance demasiado amplio conduce a proyectos inconclusos o superficiales; uno demasiado restringido limita el aprendizaje y el impacto. Determinar un alcance realista exige estimar las tareas necesarias, su duración y sus requerimientos de materiales y equipos, y compararlos con las posibilidades reales del equipo de trabajo y de la institución educativa. Un alcance explícito sirve además como acuerdo entre el equipo y el docente, porque establece desde el inicio qué resultados se esperan y con qué criterios se valorarán al final del proyecto.

El alcance puede definirse en términos del nivel de desarrollo que se pretende alcanzar: una prueba de concepto que demuestre la viabilidad del principio físico-químico, un prototipo funcional que cumpla los requerimientos principales en condiciones de laboratorio o una solución piloto que se ensaye en condiciones reales de uso. Cada nivel implica exigencias diferentes de tiempo, recursos y rigor en la evaluación. Explicitar el nivel buscado desde el inicio evita expectativas desmedidas y permite planificar el trabajo de manera coherente.

La planificación del alcance incluye la elaboración de un cronograma con las etapas del proyecto, la asignación de responsabilidades entre los integrantes del equipo y la identificación de los riesgos que podrían retrasar el trabajo. Estas herramientas de gestión, propias de la ingeniería, forman parte de las competencias que el enfoque STEAM

busca desarrollar. El currículo ecuatoriano vigente, organizado por áreas del conocimiento con un enfoque interdisciplinario, ofrece un marco para integrar estos proyectos en la planificación escolar (Ministerio de Educación del Ecuador, 2021).

4.2. Formulación de alternativas de solución

Definido el problema y establecidos los requerimientos, el siguiente paso consiste en generar varias alternativas de solución y seleccionar la más adecuada. Generar varias opciones antes de decidir evita la fijación en la primera idea y aumenta la probabilidad de encontrar una solución de calidad. Esta sección aborda la generación de opciones a partir de principios científicos, la comparación de procedimientos, la elección de materiales y recursos, la valoración inicial de la factibilidad y la selección argumentada de la alternativa que se desarrollará (Dieter y Schmidt, 2021).

4.2.1. Generación de opciones a partir de principios científicos

La generación de alternativas se enriquece cuando se parte de los principios científicos que pueden resolver el problema. Para reducir la turbidez del agua pueden aprovecharse la sedimentación por gravedad, la filtración por tamaño de partícula, la coagulación química o la adsorción en superficies porosas; para conservar el calor, la reducción de la conducción, la supresión de la convección o la reflexión de la radiación. Cada principio abre una familia de soluciones posibles, y su combinación multiplica las opciones disponibles.

Dieter y Schmidt (2021) describen diversas técnicas para la generación de conceptos, entre ellas la lluvia de ideas, la descomposición funcional del problema, las cartas morfológicas y la inspiración en soluciones de la naturaleza, conocida como biomimética. La carta morfológica, por ejemplo, descompone la solución en funciones parciales, enumera varias formas de cumplir cada una y combina esas

formas para obtener conceptos completos. Esta técnica resulta particularmente útil en proyectos escolares, porque hace visible el espacio de posibilidades y estimula combinaciones originales.

La creatividad en esta etapa se beneficia de la diversidad del equipo y de una actitud que suspende temporalmente el juicio crítico. Las ideas aparentemente poco viables pueden inspirar otras más prácticas, y la combinación de conocimientos de distintas áreas favorece soluciones innovadoras. El componente artístico del enfoque STEAM contribuye aquí mediante el bocetado, la representación visual de las ideas y la atención a la experiencia del usuario, aspectos que complementan el razonamiento científico y técnico en la búsqueda de alternativas.

4.2.2. Comparación de posibles procedimientos

Una vez generadas varias alternativas, es necesario compararlas considerando los procedimientos que requeriría cada una. Dos soluciones basadas en el mismo principio pueden diferir en la complejidad de su fabricación, el número de etapas, los tiempos de operación, la necesidad de energía externa o la cantidad de residuos que generan. La comparación de procedimientos permite anticipar dificultades prácticas que no resultan evidentes cuando las alternativas se analizan solo en términos conceptuales, y contribuye a descartar opciones inviables antes de invertir recursos en ellas.

La descripción de cada procedimiento puede realizarse mediante diagramas de flujo que muestren la secuencia de operaciones, los materiales de entrada, los productos y residuos de salida, y las condiciones de cada etapa. Esta representación facilita la comparación y permite identificar las etapas críticas, es decir, aquellas cuyo fallo comprometería el resultado. En un proceso de obtención de bioplástico, por ejemplo, el control de la temperatura durante la gelificación y las condiciones de secado constituyen etapas críticas que determinan la calidad de la película obtenida (Purba et al., 2024).

La comparación debe considerar también la reproducibilidad de cada procedimiento, es decir, la facilidad con que puede repetirse obteniendo resultados similares. Un procedimiento que depende de habilidades manuales muy específicas o de condiciones difíciles de controlar resultará menos confiable que otro con pasos claros y variables definidas. Décima (2024) comprobó que estudiantes de secundaria pudieron reproducir un filtro con carbón activado obteniendo características de filtración similares a las del prototipo original, lo que ilustra el valor de los procedimientos bien documentados.

4.2.3. Elección de materiales y recursos

Cada alternativa requiere materiales y recursos específicos, cuya disponibilidad, costo y desempeño condicionan su viabilidad. La elección de materiales debe seguir los criterios presentados en el Capítulo 3: correspondencia entre propiedades y función, cumplimiento de las restricciones, optimización de los objetivos, disponibilidad local, seguridad e impacto ambiental. El procedimiento de selección propuesto por Ashby (2021), que avanza desde la traducción de los requerimientos hasta la documentación de los candidatos, puede aplicarse de manera simplificada en esta etapa del proyecto. En esta fase conviene elaborar una lista preliminar de materiales para cada alternativa, con cantidades, costos estimados y posibles proveedores o fuentes de recuperación.

Los recursos incluyen, además de los materiales, las herramientas, los instrumentos de medición, el espacio de trabajo, el tiempo disponible y los conocimientos del equipo. Una alternativa que requiere instrumentos de medición no disponibles, o técnicas que el equipo no domina, puede resultar inviable aunque sea conceptualmente superior. Identificar estas limitaciones permite buscar soluciones creativas, como la construcción de instrumentos sencillos, la colaboración con otras instituciones o la adaptación de la alternativa a

los recursos existentes. El reconocimiento temprano de estas limitaciones permite también planificar la formación que el equipo necesita, como el uso de un instrumento o una técnica de construcción específica.

La elección de materiales recuperados o de origen local aporta ventajas económicas y ambientales, pero exige verificar que sus propiedades sean adecuadas y suficientemente homogéneas. La cascarilla de arroz, el carbón vegetal, el cartón, las botellas plásticas o las fibras vegetales presentan variaciones de composición y calidad que pueden afectar el desempeño del prototipo. Caracterizar estos materiales antes de emplearlos, mediante los ensayos sencillos descritos en el Capítulo 3, reduce la incertidumbre y facilita la interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas.

4.2.4. Valoración inicial de factibilidad

La valoración de factibilidad determina si una alternativa puede desarrollarse con éxito dentro de las condiciones del proyecto. Considera la factibilidad técnica, es decir, si existen los conocimientos y los medios para construirla; la económica, si su costo resulta asumible; la temporal, si puede completarse en el plazo disponible; la de seguridad, si sus riesgos pueden controlarse; y la social, si será aceptada por los usuarios. Una alternativa que falla en cualquiera de estas dimensiones debe replantearse o descartarse (Dieter y Schmidt, 2021).

Esta valoración es inicial porque se realiza con información incompleta, antes de construir el prototipo. Por ello, conviene complementarla con ensayos preliminares de bajo costo que verifiquen los supuestos más inciertos. Si una alternativa depende de que un material alcance determinada porosidad, un ensayo rápido de filtración con una muestra pequeña puede confirmar o refutar ese supuesto antes de construir el sistema completo. Estas pruebas

tempranas reducen el riesgo de descubrir problemas graves en etapas avanzadas del proyecto. En la práctica, estos ensayos pueden realizarse en pocas horas y con cantidades mínimas de material, por lo que su relación entre costo y beneficio resulta muy favorable.

La valoración de factibilidad debe documentarse de manera que las decisiones puedan revisarse si cambian las condiciones. La Tabla 16 presenta los criterios para valorar la factibilidad inicial de las alternativas, junto con las preguntas que orientan su aplicación. Esta tabla puede utilizarse como lista de verificación en las reuniones de planificación del equipo, y sus resultados constituyen la base para la selección argumentada de la alternativa que se desarrollará en la etapa de construcción. Una alternativa descartada por razones temporales o económicas puede recuperarse en un proyecto posterior si esas condiciones cambian.

Tabla 16. *Criterios para valorar la factibilidad inicial de alternativas*

Dimensión	Pregunta orientadora	Evidencia para responderla
Técnica	¿Se dispone de los conocimientos, materiales e instrumentos necesarios?	Inventario de recursos y ensayo preliminar
Económica	¿El costo total es asumible por el equipo o la institución?	Presupuesto estimado de materiales
Temporal	¿Puede completarse en el plazo disponible?	Cronograma con duración de cada etapa
Seguridad	¿Los riesgos pueden identificarse y controlarse?	Análisis de peligros y medidas de control
Social	¿Será aceptada y utilizada por los usuarios previstos?	Consulta a usuarios o prueba de aceptación
Ambiental	¿Su impacto resulta aceptable frente a otras opciones?	Comparación cualitativa del ciclo de vida

Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021) y Ashby (2021).

La tabla integra dimensiones que suelen evaluarse por separado y asocia cada una con una evidencia concreta, lo que transforma la valoración de factibilidad en un ejercicio fundamentado y no en una apreciación subjetiva. La inclusión de las dimensiones social y ambiental amplía la mirada técnica tradicional y reconoce que una solución puede ser técnicamente viable y, sin embargo, fracasar por falta de aceptación o por sus impactos. Para el estudiante, completar esta tabla constituye un ejercicio de pensamiento sistémico que anticipa las condiciones reales en las que la solución deberá funcionar.

4.2.5. Selección argumentada de la alternativa

La selección de la alternativa que se desarrollará debe basarse en una comparación explícita y argumentada, no en preferencias personales o en la primera idea surgida. Dieter y Schmidt (2021) describen métodos de decisión como la matriz de Pugh, que compara cada alternativa con una de referencia criterio por criterio, y la matriz de decisión ponderada, que asigna pesos a los criterios según su importancia y calcula una puntuación total para cada opción. Ambos métodos hacen transparentes los fundamentos de la decisión y facilitan su discusión en el equipo.

La matriz ponderada se construye en varios pasos: se seleccionan los criterios a partir de los requerimientos funcionales y de la valoración de factibilidad; se asigna a cada criterio un peso que refleje su importancia relativa; se califica cada alternativa en cada criterio con una escala común; y se calcula la suma ponderada de las calificaciones. La alternativa con mayor puntuación constituye la candidata preferente, aunque la decisión final debe considerar también la robustez del resultado frente a cambios razonables en los pesos asignados.

La argumentación de la selección debe quedar registrada en el informe del proyecto, explicando los criterios utilizados, los pesos asignados, las calificaciones y las razones de la elección. Este registro permite

revisar la decisión si los ensayos posteriores revelan problemas imprevistos y constituye un ejercicio de comunicación científica que el estudiante debe dominar. Las revisiones sobre la implementación de STEAM en las escuelas destacan la importancia de formar estudiantes capaces de abordar los problemas desde diferentes ángulos y de tomar decisiones fundamentadas (Amanova et al., 2025).

4.3. Construcción y puesta a prueba

La construcción del prototipo materializa la alternativa seleccionada y permite verificar si los principios, materiales y procedimientos elegidos producen el desempeño esperado. Esta etapa exige planificación, cuidado en la preparación de materiales, rigor en la construcción, ensayos sistemáticos de funcionamiento y registro detallado de las dificultades y los resultados. La sección examina cada uno de estos aspectos y propone herramientas para organizarlos, en coherencia con el ciclo de ajuste y mejora presentado al final del Capítulo 2 (Dieter y Schmidt, 2021).

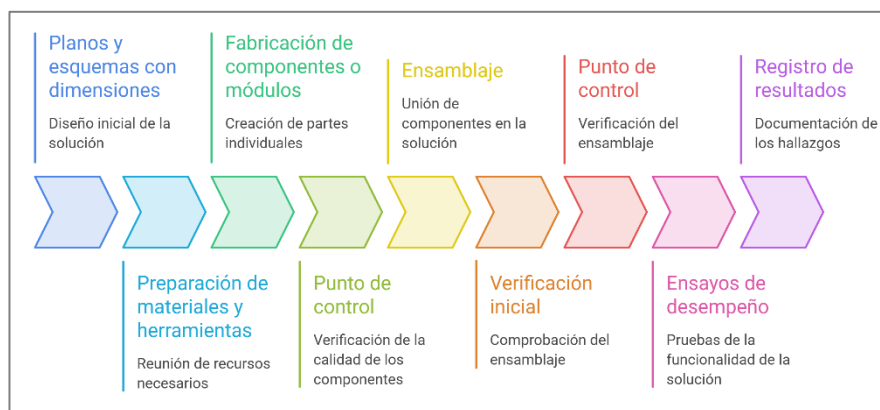
4.3.1. Organización de etapas para la elaboración

La construcción de un prototipo se facilita cuando se organiza en etapas secuenciales con objetivos definidos. Una secuencia típica incluye la elaboración de planos o esquemas con dimensiones, la preparación de materiales y herramientas, la fabricación de los componentes, el ensamblaje, la verificación inicial y los ensayos de desempeño. Cada etapa debe tener un responsable, una duración estimada y un criterio que indique cuándo se ha completado, lo que permite detectar retrasos y redistribuir tareas cuando sea necesario. Un tablero visible con el estado de cada etapa, físico o digital, ayuda al equipo a mantener una visión compartida del avance y de las tareas pendientes.

La construcción modular, en la que el prototipo se divide en subsistemas que se fabrican y verifican por separado antes de integrarse, reduce el riesgo de errores y facilita su diagnóstico. En un destilador solar, por ejemplo, pueden verificarse de manera independiente la estanqueidad del recipiente, la transparencia y la inclinación de la cubierta, y el funcionamiento del canal colector. Si el prototipo integrado no funciona correctamente, la verificación previa de cada módulo acota la búsqueda de la causa del problema.

La organización de las etapas incluye también la previsión de puntos de control en los que el equipo evalúa el avance y decide si continuar, modificar el plan o regresar a una etapa anterior. Estos puntos de control evitan que los errores se acumulen y se descubran demasiado tarde. La Figura 14 presenta las etapas para la construcción y la puesta a prueba de una solución, con los puntos de control correspondientes, y puede adaptarse a proyectos de distinta complejidad y duración.

Figura 14. Etapas para la construcción y puesta a prueba de una solución



Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021).

La figura representa la construcción como un proceso secuencial con posibilidad de retroceso en los puntos de control. Esta estructura combina la planificación ordenada con la flexibilidad necesaria para

corregir errores, y evita tanto la improvisación como la rigidez. La distinción entre verificación inicial y ensayos de desempeño resulta importante: la primera comprueba que el prototipo está correctamente construido y opera sin fallas evidentes, mientras que los segundos miden su desempeño frente a los requerimientos funcionales. Ambos pasos son necesarios y no deben confundirse durante el trabajo experimental.

4.3.2. Preparación de materiales y componentes

La preparación de materiales comprende las operaciones necesarias para que estos se encuentren en condiciones adecuadas antes de la construcción. Incluye la limpieza, el secado, el corte, la clasificación por tamaño y, en su caso, los tratamientos previos. En un filtro de agua, la arena y la grava deben lavarse repetidamente hasta que el agua de enjuague salga clara, y el carbón activado debe enjuagarse para eliminar el polvo fino que, de otro modo, oscurecería el agua filtrada durante los primeros usos (Décima, 2024).

La preparación de los componentes debe seguir las dimensiones y especificaciones de los planos, con la precisión que requiera la función. En algunos casos, pequeñas desviaciones dimensionales afectan poco al desempeño; en otros, como el ajuste de una tapa hermética o la separación entre los electrodos de una celda, resultan decisivas. Identificar las dimensiones críticas y controlarlas con especial cuidado constituye una práctica propia de la ingeniería que el estudiante debe incorporar a su trabajo experimental. Las plantillas de corte, los moldes y las guías de montaje contribuyen a mantener estas dimensiones cuando se fabrican varias unidades o varias versiones del mismo prototipo.

La seguridad durante la preparación exige conocer los peligros de cada material y operación. El corte de botellas plásticas o láminas metálicas genera bordes cortantes; la manipulación de reactivos químicos

requiere protección ocular y guantes; el calentamiento de materiales puede producir quemaduras o vapores. El Sistema Globalmente Armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos proporciona pictogramas, indicaciones de peligro y consejos de prudencia que permiten reconocer los riesgos de cada sustancia a partir de su etiqueta y de su ficha de datos de seguridad (Naciones Unidas, 2023).

4.3.3. Construcción de la solución experimental

La construcción propiamente dicha consiste en fabricar y ensamblar los componentes siguiendo el plan establecido. Durante esta etapa, el equipo debe verificar continuamente que el prototipo se ajusta a los planos y registrar cualquier desviación o modificación introducida. Las modificaciones sobre la marcha son frecuentes y a menudo necesarias, pero deben documentarse con su justificación, porque de lo contrario resulta imposible interpretar después los resultados o reproducir el prototipo. El cuaderno de laboratorio constituye la herramienta indispensable para este registro.

La calidad de las uniones entre componentes influye decisivamente en el desempeño y la durabilidad del prototipo. Las uniones pueden ser permanentes, como las pegadas o soldadas, o desmontables, como las atornilladas o encajadas. Las uniones desmontables facilitan el mantenimiento, la reparación y la separación de materiales al final de la vida útil, en coherencia con los criterios de sostenibilidad del Capítulo 3. La elección del adhesivo o del sistema de fijación debe considerar la compatibilidad química con los materiales y las condiciones de uso.

La construcción ofrece oportunidades valiosas para integrar la dimensión artística y de diseño del enfoque STEAM. La atención a las proporciones, el acabado de las superficies, la claridad de las indicaciones de uso y la apariencia general del prototipo influyen en su

aceptación por los usuarios. Un dispositivo bien terminado comunica cuidado y confiabilidad, mientras que uno descuidado genera desconfianza aunque funcione correctamente. Esta dimensión estética no es un añadido superficial, sino un componente de la calidad de la solución.

4.3.4. Comprobación de su funcionamiento

La comprobación del funcionamiento verifica si el prototipo cumple los requerimientos funcionales establecidos. Para ello deben diseñarse ensayos que midan las magnitudes especificadas en los requerimientos, en condiciones controladas y reproducibles. Si el requerimiento establece mantener un litro de agua por encima de 60 °C durante tres horas, el ensayo debe partir de un volumen y una temperatura inicial definidos, registrar la temperatura a intervalos regulares y realizarse en condiciones ambientales conocidas, de preferencia comparando con un recipiente de referencia.

Los ensayos deben repetirse varias veces para estimar la variabilidad de los resultados y distinguir los efectos reales de las fluctuaciones aleatorias. El cálculo del promedio y de la desviación estándar de las mediciones permite expresar el desempeño con su incertidumbre asociada. La inclusión de un control o referencia, como un recipiente sin aislamiento o un filtro comercial, facilita la interpretación de los resultados y la valoración del beneficio aportado por el prototipo. Çengel et al. (2024) ofrecen los fundamentos para interpretar los ensayos térmicos mediante balances de energía.

La comprobación puede revelar que el prototipo cumple todos los requerimientos, solo algunos o ninguno. En cualquier caso, los resultados aportan información para las etapas siguientes. Si el desempeño es insuficiente, el análisis de los datos debe orientar la búsqueda de las causas; si es satisfactorio, conviene verificar su estabilidad mediante ensayos prolongados o repetidos. La

representación gráfica de los resultados, por ejemplo mediante curvas de temperatura en función del tiempo, facilita la identificación de patrones y la comparación entre ensayos.

4.3.5. Registro de dificultades y resultados obtenidos

El registro sistemático de las dificultades y los resultados constituye la memoria del proyecto y la base para su mejora. Debe incluir las condiciones de cada ensayo, las mediciones obtenidas, las observaciones cualitativas, las dificultades encontradas y las decisiones tomadas para resolverlas. Un registro completo permite reconstruir el proceso, identificar patrones que no resultan evidentes en un ensayo aislado y comunicar el trabajo a otros con la transparencia que exige la práctica científica. La calidad del registro determina, en buena medida, la calidad de las conclusiones que podrán extraerse del proyecto.

Las dificultades merecen un registro tan cuidadoso como los resultados positivos. Una fuga en el destilador, una película de bioplástico que se adhiere al molde o una pila cuyo voltaje disminuye con rapidez son dificultades cuyo análisis puede conducir a mejoras significativas. Registrar la dificultad, la hipótesis sobre su causa, la acción correctiva aplicada y su efecto convierte cada problema en un aprendizaje documentado, que puede aprovecharse en proyectos futuros o por otros equipos que aborden situaciones similares. Con frecuencia, las soluciones más ingeniosas de un proyecto nacen precisamente del análisis de un problema inesperado bien documentado.

La organización del registro en formatos estandarizados facilita su uso y su comparación entre ensayos. La Tabla 17 propone un formato para el registro de dificultades, observaciones y resultados experimentales, con los campos esenciales que debe contener cada entrada. Este formato puede implementarse en papel o en una hoja de cálculo

compartida por el equipo, y su uso sistemático desarrolla hábitos de trabajo rigurosos que resultan indispensables en la investigación y en el ejercicio profesional. La hoja de cálculo ofrece la ventaja adicional de permitir la elaboración inmediata de gráficas y el cálculo de promedios y dispersiones.

Tabla 17. Registro de dificultades, observaciones y resultados experimentales

Campo	Contenido	Ejemplo
Identificación del ensayo	Número, fecha, versión del prototipo y responsables	Ensayo 4, versión 2, equipo A
Condiciones	Temperatura ambiente, humedad y otras variables relevantes	18 °C, humedad relativa del 65 %
Procedimiento	Pasos seguidos y cambios respecto del ensayo anterior	Se aumentó el espesor del aislante a 3 cm
Mediciones	Valores obtenidos con sus unidades e instrumentos	Temperatura final de 64 °C a las 3 horas
Observaciones	Hechos cualitativos relevantes	Condensación en la cara interna de la tapa
Dificultades	Problemas encontrados durante el ensayo	Pérdida de calor por el cierre de la tapa
Acción correctiva	Decisión tomada y justificación	Incorporar un burlete en el borde de la tapa

Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021).

La tabla estructura el registro de modo que cada ensayo quede documentado con la información necesaria para interpretarlo y reproducirlo. La inclusión de los cambios respecto del ensayo anterior permite rastrear la evolución del prototipo y atribuir las variaciones de desempeño a modificaciones concretas. Los campos de dificultades y acciones correctivas vinculan el registro con el proceso de mejora, de manera que la documentación no se limita a describir lo ocurrido, sino

que orienta las decisiones futuras. El ejemplo del conservador térmico ilustra cómo una observación cualitativa, la condensación en la tapa, conduce a identificar una pérdida y proponer una corrección.

4.4. Ajuste y optimización del desempeño

Un prototipo rara vez alcanza su mejor desempeño en la primera versión. La optimización consiste en mejorar sistemáticamente el prototipo mediante la identificación de sus limitaciones, la modificación de las condiciones físico-químicas, la sustitución o adecuación de materiales y la comparación entre versiones, hasta determinar la configuración más eficiente. Dieter y Schmidt (2021) vinculan la optimización con el diseño robusto, cuyo objetivo es lograr un desempeño poco sensible a las variaciones de las condiciones de fabricación y uso. Esta sección desarrolla estos aspectos con orientaciones aplicables al trabajo experimental.

4.4.1. Identificación de limitaciones funcionales

Las limitaciones funcionales son las características del prototipo que impiden o restringen el cumplimiento de los requerimientos. Pueden manifestarse como un desempeño insuficiente, una variabilidad excesiva, una durabilidad reducida o dificultades de uso. Su identificación parte de la comparación entre los resultados de los ensayos y los requerimientos, y continúa con el análisis de las causas mediante los principios físico-químicos. Un conservador térmico que pierde calor demasiado rápido, por ejemplo, puede presentar limitaciones en el aislamiento de las paredes, en el cierre de la tapa o en la radiación desde su superficie.

El análisis de las limitaciones se beneficia de mediciones adicionales que permitan localizar su origen. En el caso térmico, medir la temperatura en distintos puntos de la superficie exterior revela las zonas de mayor pérdida; en un filtro, medir la turbidez del agua tras

cada capa identifica la etapa menos eficaz; en una celda electroquímica, medir la resistencia interna y el voltaje en circuito abierto distingue entre problemas del electrolito y de los electrodos. Estas mediciones transforman una apreciación general en un diagnóstico preciso.

El análisis de modos de falla y sus efectos, conocido por sus siglas AMFE, constituye una herramienta sistemática para anticipar y priorizar las limitaciones. Consiste en enumerar las formas en que cada componente podría fallar, estimar la gravedad, la probabilidad y la detectabilidad de cada modo de falla, y priorizar la atención sobre los más críticos. Dieter y Schmidt (2021) presentan esta herramienta dentro del análisis de riesgo y confiabilidad, y su versión simplificada resulta aplicable a los prototipos escolares.

4.4.2. Modificación de condiciones físico-químicas

Muchas limitaciones pueden superarse modificando las condiciones físico-químicas de operación sin cambiar los materiales ni el diseño. En una celda electroquímica, aumentar la concentración del electrolito o el área de los electrodos incrementa la corriente disponible; en un proceso de coagulación, ajustar el pH y la dosis de coagulante mejora la formación de flóculos; en la elaboración de bioplásticos, variar la temperatura y el tiempo de gelificación modifica las propiedades de la película. Estas modificaciones se fundamentan en los principios estudiados en los Capítulos 1 y 2.

La modificación de condiciones debe realizarse de manera sistemática, variando una sola condición en cada serie de ensayos y manteniendo constantes las demás. Cuando varias condiciones pueden interactuar, el diseño de experimentos ofrece estrategias más eficientes, como los diseños factoriales, que permiten estudiar el efecto de varias variables y sus interacciones con un número reducido de ensayos. Dieter y Schmidt (2021) incluyen estas técnicas entre las

herramientas de diseño robusto y optimización, y su versión más sencilla, el diseño factorial de dos niveles, resulta accesible en contextos escolares.

La representación gráfica de los resultados permite identificar las condiciones óptimas. Una curva del desempeño en función de la variable modificada puede mostrar un máximo, un mínimo o una tendencia que se estabiliza a partir de cierto valor. En este último caso, incrementar la variable más allá del punto de estabilización consume recursos sin mejorar el resultado. Reconocer estos comportamientos requiere conocimientos matemáticos básicos sobre funciones y su representación, lo que refuerza la integración entre ciencias experimentales y matemática propia del enfoque STEAM.

4.4.3. Sustitución o adecuación de materiales

Cuando las modificaciones de las condiciones no bastan, puede ser necesario sustituir o adecuar los materiales del prototipo. La sustitución reemplaza un material por otro con propiedades más adecuadas para la función; la adecuación modifica las propiedades del material existente mediante los tratamientos descritos en el Capítulo 3. Reemplazar el cartón por poliestireno expandido en las paredes de un conservador térmico constituye una sustitución; aumentar el espesor del cartón o añadir una capa reflectante de papel de aluminio, una adecuación (Callister y Rethwisch, 2022).

La decisión entre sustituir y adecuar debe considerar el desempeño, el costo, la disponibilidad y el impacto ambiental de cada opción. La adecuación suele ser preferible cuando permite alcanzar el desempeño requerido con materiales ya disponibles y de menor impacto, mientras que la sustitución se justifica cuando el material original presenta limitaciones que ningún tratamiento puede superar. En ambos casos, la nueva versión debe ensayarse en las mismas

condiciones que la anterior para que la comparación resulte válida y permita atribuir las diferencias al cambio de material.

La adecuación de materiales ofrece oportunidades para la innovación. Purba et al. (2024) mostraron que la adición de quitosano mejoró la resistencia a la tracción y la elongación de bioplásticos de almidón, lo que ilustra cómo una modificación en la composición puede superar las limitaciones mecánicas de un material biodegradable. Del mismo modo, la activación química del carbón vegetal descrita por Décima (2024) transforma un material de baja capacidad adsorbente en otro útil para la filtración, sin necesidad de recurrir a productos comerciales costosos.

4.4.4. Comparación entre versiones de la propuesta

La optimización genera sucesivas versiones del prototipo, cada una con modificaciones respecto de la anterior. Compararlas de manera sistemática permite evaluar el efecto de cada modificación y decidir cuáles incorporar a la configuración final. La comparación debe realizarse con los mismos ensayos, en condiciones equivalentes y con los mismos criterios de evaluación, porque cualquier diferencia en el procedimiento de ensayo podría confundirse con un efecto de la modificación introducida. Conviene asignar a cada versión un identificador único y conservar, cuando sea posible, las versiones anteriores o su registro fotográfico, de modo que puedan examinarse de nuevo si surgen dudas sobre sus resultados.

La comparación debe considerar todos los requerimientos relevantes y no solo el desempeño principal. Una modificación que mejora el desempeño térmico de un conservador puede incrementar su costo, su peso o su impacto ambiental, o reducir su facilidad de uso. Por ello, conviene evaluar cada versión en todos los criterios establecidos y analizar los compromisos que implica cada mejora. La matriz de decisión ponderada, utilizada en la selección de alternativas, puede

aplicarse también en esta etapa para integrar los distintos criterios en una valoración de conjunto.

La documentación de la comparación entre versiones permite reconstruir el proceso de optimización y justificar la configuración final. La Tabla 18 presenta un formato para comparar versiones durante la optimización de una propuesta, ilustrado con el ejemplo de un conservador térmico. Este formato hace visible la evolución del prototipo y los efectos de cada modificación, y constituye un insumo valioso para el informe final del proyecto y para su comunicación a la comunidad educativa. Los datos incluidos en el ejemplo son ilustrativos y cada equipo debe sustituirlos por sus propias mediciones.

Tabla 18. *Comparación de versiones durante la optimización de una propuesta*

Versión	Modificación introducida	Temperatura a las 3 h	Costo relativo	Valoración
V1	Caja de cartón simple con recipiente interior	48 °C	Bajo	No cumple
V2	Paredes de cartón doble con papel arrugado	55 °C	Bajo	No cumple
V3	V2 más forro reflectante de papel de aluminio	59 °C	Bajo	Cercana
V4	V3 más burlete en el cierre de la tapa	63 °C	Bajo	Cumple
V5	Paredes de poliestireno expandido y forro reflectante	67 °C	Medio	Cumple

Nota. Datos ilustrativos para un conservador térmico con 1 L de agua a 90 °C. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021) y Çengel et al. (2024).

La tabla muestra una progresión en la que cada versión incorpora una modificación orientada a reducir una vía específica de pérdida de calor: la conducción mediante el doble cartón y el papel arrugado, la radiación mediante el forro reflectante y la convección mediante el burlete. Esta secuencia refleja la aplicación de los principios de transferencia térmica del Capítulo 2 al proceso de optimización. La comparación entre V4 y V5 ilustra un compromiso característico: la versión con poliestireno ofrece mejor desempeño, pero con mayor costo e impacto, mientras que V4 cumple el requerimiento con materiales recuperados de bajo costo.

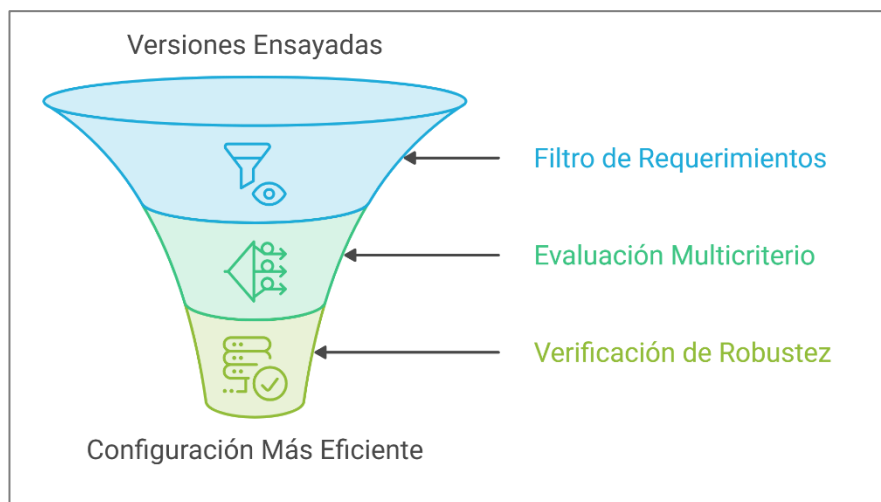
4.4.5. Determinación de la configuración más eficiente

La configuración más eficiente es aquella que cumple los requerimientos obligatorios con el mejor balance entre desempeño, costo, recursos e impacto. No siempre coincide con la versión de mayor desempeño, porque una mejora marginal puede no justificar un aumento considerable de costo o de impacto ambiental. Determinarla exige aplicar los criterios de evaluación de manera integrada y considerar el contexto en que se utilizará la solución, incluidas las posibilidades económicas y las preferencias de los usuarios (Dieter y Schmidt, 2021).

El concepto de eficiencia debe entenderse aquí en sentido amplio, abarcando la eficiencia energética del dispositivo, la eficiencia en el uso de materiales y la eficiencia económica. Ashby (2021) propone considerar el ciclo de vida completo al comparar alternativas, de modo que la energía y los materiales incorporados en la fabricación se sumen a los consumidos durante el uso. En el ejemplo del conservador térmico, la versión con cartón y materiales recuperados puede resultar más eficiente en conjunto que la de poliestireno, aunque su desempeño térmico sea algo menor.

La determinación de la configuración más eficiente debe acompañarse de una verificación de su robustez, es decir, de su capacidad para mantener el desempeño ante variaciones razonables en las condiciones de uso y fabricación. Ensayar la configuración elegida con distintas temperaturas ambientales, volúmenes de líquido o lotes de materiales permite confirmar que su desempeño no depende de condiciones excepcionales. La Figura 15 presenta el proceso de selección de la configuración con mejor desempeño, integrando la comparación de versiones, la evaluación multicriterio y la verificación de robustez.

Figura 15. Proceso de selección de la configuración con mejor desempeño



Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021) y Ashby (2021).

La figura representa la selección como un proceso de filtrado progresivo en el que cada nivel aplica un criterio más exigente. El primer filtro descarta las versiones que no cumplen los requerimientos obligatorios; la evaluación multicriterio ordena las restantes; y la verificación de robustez confirma que la elegida mantendrá su desempeño en condiciones reales. La flecha de retorno recuerda que,

si ninguna versión supera todos los filtros, el proceso de optimización debe continuar. Este esquema ofrece al estudiante una estructura clara para justificar la configuración final ante evaluadores y usuarios.

4.5. Valoración integral de la solución desarrollada

Concluida la optimización, la solución debe valorarse de manera integral, considerando no solo su funcionamiento frente al problema, sino también su eficiencia en el uso de recursos, su seguridad, sus repercusiones ambientales y sus posibilidades de adaptación y mejora. Esta valoración cierra el ciclo del proyecto y aporta la información necesaria para decidir si la solución puede transferirse a los usuarios, si requiere desarrollo adicional o si conviene replantearla. La sección presenta los criterios y herramientas para realizar esta valoración (Dieter y Schmidt, 2021; Ashby, 2021).

4.5.1. Funcionamiento frente al problema planteado

La valoración del funcionamiento verifica en qué medida la solución resuelve el problema que dio origen al proyecto. Esta verificación va más allá del cumplimiento de los requerimientos medidos en el laboratorio e implica examinar si la solución satisface la necesidad original en las condiciones reales de uso. Un filtro que reduce la turbidez en los ensayos puede resultar insuficiente si el agua de la comunidad presenta una carga de sedimentos mayor que la simulada, o si los usuarios no disponen de tiempo para esperar el proceso de filtración.

Por esta razón, la valoración del funcionamiento debe incluir, cuando sea posible, ensayos en condiciones reales o representativas, con la participación de los usuarios previstos. Estos ensayos de campo revelan aspectos que no se manifiestan en el laboratorio, como las dificultades de uso, los hábitos que afectan el desempeño o las variaciones de las condiciones ambientales. La retroalimentación de

los usuarios constituye una fuente de información valiosa para identificar mejoras y para confirmar que la solución responde efectivamente a sus necesidades.

La valoración debe reconocer honestamente las limitaciones de la solución. Ningún prototipo escolar resuelve completamente un problema complejo, y la comunicación clara de lo que la solución puede y no puede hacer forma parte de la responsabilidad del equipo. En el caso de los dispositivos relacionados con el agua para consumo, esta honestidad adquiere especial importancia, porque una confianza excesiva en la solución podría exponer a los usuarios a riesgos para su salud si el tratamiento no incluye una etapa de desinfección adecuada.

4.5.2. Eficiencia en el empleo de recursos

La eficiencia en el empleo de recursos evalúa la relación entre los beneficios que aporta la solución y los recursos que consume en su fabricación y uso. Los recursos considerados incluyen los materiales, la energía, el agua, el tiempo y el dinero. Una solución eficiente obtiene el beneficio requerido con el menor consumo posible de recursos, o maximiza el beneficio con los recursos disponibles. Esta evaluación retoma los criterios de eficiencia energética presentados en el Capítulo 3 y los amplía a otros recursos (Ashby, 2021).

La cuantificación de la eficiencia puede expresarse mediante indicadores sencillos, como el costo por litro de agua filtrada, la energía ahorrada por cada kilogramo de material empleado o el tiempo de retorno de la inversión. Estos indicadores permiten comparar la solución con alternativas comerciales o tradicionales y valorar su conveniencia para los usuarios. Su cálculo integra conocimientos de matemática y economía, y aporta argumentos concretos para comunicar los beneficios de la solución a la comunidad y a posibles financiadores. Expresar estos indicadores en unidades familiares para

la comunidad, como dólares ahorrados al mes, facilita su comprensión.

La eficiencia en el empleo de recursos se relaciona también con la escalabilidad de la solución, es decir, con la posibilidad de reproducirla en mayor número o tamaño. Una solución que utiliza materiales abundantes, procedimientos sencillos y herramientas comunes resulta más escalable que otra dependiente de recursos escasos o de habilidades especializadas. Kirchherr et al. (2023) señalan que el desarrollo sostenible aparece cada vez más como la finalidad principal de la economía circular, perspectiva que orienta hacia soluciones replicables y basadas en recursos recuperados.

4.5.3. Seguridad durante su utilización

La seguridad de la solución debe valorarse considerando todos los riesgos que podría generar durante su fabricación, uso, mantenimiento y disposición. Los riesgos pueden ser mecánicos, como bordes cortantes o piezas inestables; térmicos, como superficies calientes; eléctricos, como contactos accesibles o sobrecalentamiento de conductores; químicos, como la liberación de sustancias tóxicas o el contacto con reactivos corrosivos; y biológicos, como la proliferación de microorganismos en filtros mal mantenidos. Cada tipo de riesgo requiere medidas de control específicas (Dieter y Schmidt, 2021).

La jerarquía de controles ofrece un orden de preferencia para reducir los riesgos: eliminar el peligro cuando sea posible, sustituirlo por uno menor, aislarlo mediante barreras de ingeniería, establecer procedimientos y señalización, y recurrir en último término al equipo de protección personal. En un dispositivo que emplea una disolución corrosiva, por ejemplo, la sustitución por un electrolito menos agresivo resulta preferible a depender del uso de guantes. La comunicación de los peligros químicos debe seguir los elementos del Sistema Globalmente Armonizado (Naciones Unidas, 2023).

La información sobre el uso seguro de la solución debe transmitirse a los usuarios mediante instrucciones claras, advertencias visibles y, cuando sea necesario, capacitación. Los aspectos de mantenimiento, como la frecuencia de limpieza o reemplazo de un medio filtrante, forman parte de la seguridad, porque su omisión puede convertir una solución útil en un riesgo. La Tabla 19 presenta los criterios de seguridad para la utilización de soluciones experimentales, organizados por tipo de riesgo y acompañados de las medidas de control correspondientes.

Tabla 19. *Criterios de seguridad para la utilización de soluciones experimentales*

Tipo de riesgo	Ejemplos de peligro	Medidas de control
Mecánico	Bordes cortantes, piezas inestables, partes móviles	Lijado de bordes, bases amplias, protecciones fijas
Térmico	Superficies calientes, vapor, líquidos a alta temperatura	Aislamiento exterior, asas aislantes, señalización
Eléctrico	Contactos accesibles, sobrecalentamiento de cables	Baja tensión, conexiones aisladas, conductores de sección adecuada
Químico	Reactivos corrosivos, gases, productos tóxicos	Sustitución por sustancias menos peligrosas, etiquetado según el SGA, ventilación
Biológico	Proliferación de microorganismos en medios húmedos	Limpieza periódica, reemplazo del medio filtrante, desinfección final del agua
De uso	Manipulación incorrecta o mantenimiento omitido	Instrucciones claras, advertencias visibles, capacitación de usuarios

Nota. Elaborada a partir de Dieter y Schmidt (2021) y Naciones Unidas (2023).

La tabla organiza los riesgos según su naturaleza y asocia cada uno con medidas de control que privilegian la eliminación o la reducción del peligro frente a la protección individual. La inclusión del riesgo biológico resulta especialmente pertinente en los dispositivos de tratamiento de agua, donde la humedad y la materia orgánica retenida

pueden favorecer el crecimiento microbiano si no se realiza un mantenimiento adecuado. El riesgo de uso recuerda que la seguridad depende no solo del diseño, sino también de la información disponible para los usuarios. Aplicar esta tabla a cada proyecto convierte la seguridad en un criterio explícito de valoración.

4.5.4. Repercusiones ambientales de su aplicación

Las repercusiones ambientales de la solución deben valorarse a lo largo de su ciclo de vida, desde la obtención de los materiales hasta su disposición final. Esta valoración considera el consumo de recursos naturales, las emisiones generadas durante la fabricación y el uso, los residuos producidos y la posibilidad de recuperar los materiales al final de la vida útil. Ashby (2021) propone las ecoauditorías como herramientas para estimar de manera aproximada estas repercusiones e identificar la etapa del ciclo de vida que concentra el mayor impacto.

Las repercusiones ambientales pueden ser tanto negativas como positivas. Una solución que emplea materiales recuperados evita la extracción de materias primas y reduce la cantidad de residuos enviados a disposición final; un dispositivo que reduce el consumo de gas para cocinar disminuye las emisiones asociadas a la combustión. La valoración integral debe considerar ambos tipos de repercusión y expresar, cuando sea posible, el balance neto. Esta perspectiva permite identificar soluciones que no solo minimizan su impacto, sino que contribuyen a mejorar la situación ambiental.

La valoración ambiental debe incluir también los residuos que genera el uso y el mantenimiento de la solución, como los medios filtrantes agotados, las disoluciones electrolíticas usadas o los materiales desgastados. Prever su gestión adecuada desde el diseño, mediante la elección de materiales biodegradables, reciclables o regenerables, completa el compromiso ambiental del proyecto. Los criterios presentados en la Tabla 14 del Capítulo 3 ofrecen una guía para realizar

esta valoración de manera estructurada y comparable entre proyectos. Un filtro cuyo medio agotado puede compostarse o regenerarse presenta, en este sentido, ventajas claras frente a otro que genera residuos persistentes.

4.5.5. Posibilidades de adaptación y mejora

Toda solución puede adaptarse a otros contextos y mejorarse con nuevos conocimientos, materiales o necesidades. La valoración integral debe identificar estas posibilidades, que constituyen el punto de partida para proyectos futuros. La adaptación puede consistir en modificar la escala de la solución, ajustarla a otros usuarios o condiciones ambientales, o aplicar su principio a problemas diferentes. La mejora puede orientarse a superar las limitaciones identificadas, incorporar nuevas funciones o reducir el costo y el impacto de la solución. Registrar estas posibilidades evita que el conocimiento generado se pierda al concluir el proyecto.

La identificación de las posibilidades de adaptación se beneficia de la reflexión sobre los principios físico-químicos que sustentan la solución. Un conservador térmico basado en la reducción de la conducción, la convección y la radiación puede adaptarse para mantener alimentos fríos, conservar medicamentos o climatizar pequeños espacios, porque los principios subyacentes son los mismos. Esta capacidad de transferir un principio a situaciones nuevas constituye uno de los aprendizajes más valiosos del enfoque STEAM, porque muestra el alcance general del conocimiento científico.

La documentación de las posibilidades de adaptación y mejora debe formar parte del informe final del proyecto y de su comunicación a la comunidad. Compartir los resultados, las limitaciones y las propuestas de mejora mediante exposiciones, publicaciones escolares o repositorios abiertos permite que otros equipos continúen el trabajo y que la solución evolucione. Las revisiones sobre STEAM en las aulas de

ciencias destacan el valor de estas experiencias integradoras (Yulianti et al., 2024), y el Capítulo 5 presenta aplicaciones concretas en las que estas etapas se ponen en práctica ante desafíos del entorno.



CAPÍTULO 5

Aplicaciones Físico-Químicas
ante Desafíos del Entorno



Capítulo 5. Aplicaciones Físico-Químicas ante Desafíos del Entorno

Los capítulos precedentes construyeron un recorrido que va desde los principios físico-químicos hasta el proceso de diseño, construcción y optimización de soluciones. Este capítulo final aplica ese recorrido a cuatro desafíos presentes en numerosas comunidades: el acondicionamiento del agua, el uso eficiente de la energía, el deterioro de los materiales y la gestión de los residuos. Cada desafío se analiza desde los fenómenos que lo explican, las estrategias disponibles para enfrentarlo y los criterios para elegir entre ellas según el contexto, en coherencia con las revisiones que destacan el valor de vincular la enseñanza de las ciencias con problemas reales (Yulianti et al., 2024).

La última sección presenta cinco casos de proyectos experimentales con enfoque STEAM que integran los contenidos del libro: un sistema de filtración con materiales de distinta naturaleza, un dispositivo de conservación térmica, una aplicación electroquímica con materiales accesibles, la transformación de residuos en un material útil y una solución para reducir el deterioro de materiales expuestos al ambiente. Cada caso describe el problema, los principios involucrados, los materiales, el procedimiento y los criterios de evaluación, y concluye con una comparación que facilita su adaptación a distintos contextos educativos.

5.1. Agua y procesos de acondicionamiento

El acceso a agua de calidad adecuada constituye una necesidad básica cuya satisfacción depende de procesos físico-químicos de separación, adsorción y desinfección. La Organización Mundial de la Salud (2022) orienta la gestión de la calidad del agua mediante planes de seguridad que abarcan desde la fuente de captación hasta el consumidor, y recomienda identificar los peligros y controlar los riesgos en cada

etapa. Esta sección examina las propiedades que determinan la calidad del agua, la separación de partículas, la adsorción, la combinación de procedimientos y la valoración de alternativas según el contexto.

5.1.1. Propiedades determinantes de la calidad del agua

La calidad del agua se describe mediante propiedades físicas, químicas y microbiológicas. Entre las físicas destacan la turbidez, que expresa la presencia de partículas en suspensión que dispersan la luz; el color, asociado frecuentemente con materia orgánica disuelta; el olor y el sabor; y la temperatura. Las propiedades químicas incluyen el pH, la conductividad eléctrica, que indica la cantidad de sales disueltas, la dureza, debida principalmente a los iones de calcio y magnesio, y la presencia de sustancias específicas como nitratos, metales o compuestos orgánicos (Overby y Chang, 2022). Ninguna de estas propiedades, considerada de forma aislada, basta para describir la calidad del agua.

Las propiedades microbiológicas se refieren a la presencia de bacterias, virus y protozoos, algunos de ellos patógenos. La Organización Mundial de la Salud (2022) considera la contaminación microbiana como el riesgo más frecuente y de mayor impacto para la salud asociado al agua de consumo. Las propiedades físicas y químicas se relacionan con este riesgo: una turbidez elevada, por ejemplo, puede proteger a los microorganismos frente a la acción de los desinfectantes y reducir la eficacia del tratamiento, lo que explica la importancia de clarificar el agua antes de desinfectarla.

En los proyectos escolares, varias de estas propiedades pueden medirse con instrumentos accesibles. La turbidez puede estimarse mediante tubos de comparación o sensores de luz; el pH, mediante tiras indicadoras o extractos vegetales; la conductividad, con conductímetros sencillos o circuitos contruidos por los estudiantes; y

la temperatura, con termómetros digitales. Las propiedades microbiológicas, en cambio, requieren análisis de laboratorio especializados, lo que obliga a reconocer que ningún ensayo escolar basta para declarar que un agua es apta para el consumo humano. Esta limitación debe explicitarse en todos los informes y comunicaciones del proyecto.

5.1.2. Separación de partículas y sustancias no deseadas

La separación de partículas constituye la primera etapa de la mayoría de los procesos de acondicionamiento del agua. Las partículas gruesas se retiran mediante rejillas y tamices; las sedimentables, mediante decantación en reposo; y las finas, que no sedimentan con facilidad, mediante coagulación, floculación y filtración. Estos procesos, estudiados en el Capítulo 2, aprovechan las diferencias de tamaño y densidad entre las partículas y el agua, así como la neutralización de las cargas superficiales que mantienen dispersas a las partículas coloidales (Overby y Chang, 2022).

La filtración lenta en arena representa una tecnología de especial interés para comunidades pequeñas, porque combina la separación física con procesos biológicos. En la superficie del lecho de arena se desarrolla una capa biológica que contribuye a retener y degradar partículas y microorganismos. Su funcionamiento requiere un caudal bajo y un mantenimiento periódico que consiste en retirar la capa superficial cuando el lecho se colmata. Los filtros domésticos de arena de flujo intermitente aplican principios semejantes a pequeña escala. Su sencillez constructiva y su bajo costo de operación explican su uso continuado en sistemas rurales de abastecimiento.

La separación de sustancias disueltas resulta más compleja, porque estas atraviesan los filtros convencionales. Las sales pueden separarse mediante destilación, incluida la destilación solar, o mediante membranas de ósmosis inversa; los iones metálicos, mediante

precipitación química o intercambio iónico; y los compuestos orgánicos que aportan color, olor o sabor, mediante adsorción. La elección del procedimiento depende de la naturaleza de la sustancia que se desea eliminar, de su concentración y de los recursos disponibles para el tratamiento. En los proyectos escolares, la destilación solar y la adsorción constituyen las opciones más accesibles para abordar este tipo de contaminantes.

5.1.3. Adsorción y materiales con capacidad de retención

La adsorción es el proceso por el cual las moléculas o iones de una sustancia disuelta se adhieren a la superficie de un sólido. A diferencia de la absorción, que implica la penetración en el volumen del material, la adsorción es un fenómeno superficial cuya magnitud depende del área disponible. Por ello, los adsorbentes más eficaces son materiales con una porosidad muy elevada, como el carbón activado, cuya superficie interna puede alcanzar valores extraordinariamente altos por cada gramo de material (Atkins et al., 2023). Esta propiedad explica que pequeñas cantidades de carbón activado puedan tratar volúmenes considerables de agua antes de saturarse.

La cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio depende de su concentración en el agua y de la temperatura, relación que se describe mediante isothermas de adsorción como las de Langmuir y Freundlich. La isoterma de Langmuir supone la formación de una monocapa sobre una superficie con sitios equivalentes, mientras que la de Freundlich describe superficies heterogéneas. Estas relaciones permiten estimar la capacidad de un adsorbente y el momento en que se satura, dato necesario para planificar su reemplazo o regeneración (Atkins et al., 2023). En contextos escolares, la curva de decoloración de un colorante en función de la masa de adsorbente ofrece una aproximación sencilla a estas relaciones.

Además del carbón activado comercial, numerosos materiales de origen local presentan capacidad de retención. El carbón obtenido de cáscaras de coco, huesos de fruta o cascarilla de arroz puede activarse con reactivos de bajo riesgo, como mostró Décima (2024) al emplear jugo de limón como agente activante y evaluar la capacidad adsorbente del material obtenido. Las arcillas, las zeolitas naturales y ciertos residuos agrícolas también retienen sustancias disueltas. La evaluación de estos materiales mediante ensayos con colorantes permite comparar su eficacia de manera sencilla.

5.1.4. Combinación de procedimientos de acondicionamiento

Ningún procedimiento aislado resuelve todos los problemas de calidad del agua, por lo que los sistemas eficaces combinan varias etapas en secuencia. Este enfoque de barreras múltiples, que la Organización Mundial de la Salud (2022) considera fundamental para la seguridad del agua, reduce el riesgo de que un fallo en una etapa comprometa el resultado final. Cada barrera actúa sobre un tipo de contaminante o complementa la acción de las demás, de manera que el sistema en su conjunto alcanza una eficacia superior a la de cualquier etapa individual.

Una secuencia típica para el acondicionamiento domiciliario o comunitario incluye la sedimentación previa para retirar las partículas gruesas, la filtración a través de lechos de grava y arena para eliminar las partículas finas, la adsorción con carbón activado para reducir el color, el olor y el sabor, y la desinfección para inactivar los microorganismos. La desinfección puede realizarse mediante ebullición, cloración o exposición solar prolongada en recipientes transparentes, y debe aplicarse siempre al final, cuando el agua ya ha sido clarificada. La exposición solar requiere recipientes limpios y agua previamente clarificada para resultar eficaz.

El orden de las etapas responde a una lógica física y química: la clarificación previa protege el medio adsorbente de la saturación prematura y mejora la eficacia de la desinfección, porque las partículas en suspensión pueden proteger a los microorganismos. La Figura 16 presenta la integración de procedimientos para el acondicionamiento del agua, con la propiedad física o química que aprovecha cada etapa y el tipo de contaminante sobre el que actúa, y sirve como base para el caso de filtración presentado en la sección 5.5.

Figura 16. Integración de procedimientos para el acondicionamiento del agua



Nota. Elaborada a partir de Organización Mundial de la Salud (2022) y Décima (2024).

La figura muestra cómo cada barrera actúa sobre un tipo de contaminante mediante un principio físico-químico distinto, y cómo el

orden de las etapas maximiza la eficacia del conjunto. La desinfección aparece como etapa final indispensable, porque las etapas anteriores reducen la carga de partículas y sustancias disueltas, pero no garantizan la eliminación de los microorganismos patógenos. Esta representación ayuda al estudiante a comprender que un filtro escolar constituye solo una parte del sistema de acondicionamiento, y que su valor depende de su integración con las demás barreras necesarias para obtener agua segura.

5.1.5. Valoración de alternativas según el contexto

La elección de un sistema de acondicionamiento del agua depende de las características del agua disponible, de las necesidades de los usuarios y de los recursos del contexto. Un agua con alta turbidez requiere etapas de clarificación más robustas que un agua de pozo relativamente clara; un agua salobre exige procesos de separación de sales que no son necesarios en otros casos. La caracterización previa del agua, aunque sea parcial, resulta indispensable para seleccionar los procedimientos adecuados y evitar inversiones en etapas innecesarias.

Los recursos del contexto incluyen la disponibilidad de energía, materiales, capacidades técnicas para el mantenimiento y recursos económicos. En zonas sin acceso regular a electricidad, los sistemas que funcionan por gravedad y con energía solar ofrecen ventajas evidentes; en comunidades con capacidad de organización, los sistemas comunitarios pueden resultar más eficientes que los domiciliarios. La aceptación cultural de la tecnología, que depende de su facilidad de uso y de su compatibilidad con los hábitos existentes, condiciona también su adopción y su uso sostenido.

La valoración de las alternativas puede realizarse mediante las matrices de decisión presentadas en el Capítulo 4, con criterios como la eficacia en la reducción de los contaminantes presentes, el costo de

construcción y operación, la facilidad de mantenimiento, la disponibilidad de materiales y la aceptación por los usuarios. Esta valoración debe realizarse con la participación de la comunidad, porque una solución técnicamente superior que no se utiliza o no se mantiene adecuadamente resulta, en la práctica, menos eficaz que otra más sencilla que se incorpora a la vida cotidiana.

5.2. Energía y eficiencia en situaciones cotidianas

El consumo de energía en los hogares, las escuelas y los pequeños negocios representa una proporción considerable de sus gastos y de sus impactos ambientales. La cocción de alimentos, el calentamiento de agua, la iluminación y el funcionamiento de equipos eléctricos constituyen los principales usos, y en todos ellos existen oportunidades de mejora basadas en los principios de transferencia térmica y conversión energética estudiados en los capítulos anteriores. Esta sección aborda la identificación de pérdidas, la conservación térmica, el aprovechamiento de fuentes disponibles, la conversión para usos específicos y las mejoras orientadas al consumo eficiente (Çengel et al., 2024).



5.2.1. Identificación de pérdidas energéticas

Las pérdidas energéticas en las situaciones cotidianas suelen pasar inadvertidas porque no generan efectos visibles inmediatos. Una olla destapada pierde calor por convección y evaporación; una llama que sobrepasa el fondo del recipiente calienta el aire en lugar del alimento; una ventana mal sellada permite el intercambio de aire caliente y frío; un equipo en modo de espera consume electricidad de manera continua. Identificar estas pérdidas constituye el primer paso para reducirlas, y requiere una observación atenta guiada por los principios físicos (Çengel et al., 2024). Cada una de estas pérdidas puede asociarse con uno de los mecanismos de transferencia estudiados en el Capítulo 2.

La identificación puede sistematizarse mediante auditorías energéticas sencillas, en las que se registran los equipos y procesos que consumen energía, su potencia, su tiempo de uso y las pérdidas observables. Un medidor de consumo eléctrico conectado entre el enchufe y el equipo permite medir el consumo real, incluido el de espera. En el caso de la cocción con gas, el registro del tiempo de uso de la hornilla para preparar un alimento determinado, con y sin tapa, cuantifica el efecto de una medida sencilla sobre el consumo.

La representación de los resultados mediante diagramas de flujo energético, como los presentados en el Capítulo 1, permite visualizar la proporción de energía útil frente a la pérdida en cada proceso. Esta visualización orienta la priorización de las mejoras hacia los procesos con mayores pérdidas absolutas, que no siempre coinciden con los de menor eficiencia relativa. Un equipo de baja eficiencia pero de uso muy esporádico puede ser menos relevante que otro algo más eficiente pero en funcionamiento permanente, como ocurre con los refrigeradores.

5.2.2. Conservación térmica mediante materiales accesibles

La conservación térmica consiste en reducir el intercambio de calor entre un sistema y su entorno para mantener su temperatura durante el mayor tiempo posible. Se aplica tanto a sistemas calientes, como los alimentos cocinados o el agua caliente, como a sistemas fríos, como los alimentos refrigerados o los medicamentos que requieren baja temperatura. Los principios son los mismos en ambos casos: reducir la conducción mediante materiales aislantes, suprimir la convección mediante cierres herméticos y limitar la radiación mediante superficies reflectantes (Çengel et al., 2024). La misma caja aislante puede servir para ambos propósitos si se diseña con materiales que toleren la humedad.

Los materiales accesibles con propiedades aislantes incluyen el cartón corrugado, el papel arrugado, los textiles gruesos, la lana, el aserrín seco, la cascarilla de arroz, la paja y las espumas recuperadas de embalajes. Su eficacia depende de su capacidad para retener aire inmóvil entre sus fibras o partículas, y disminuye si se humedecen. El papel de aluminio recuperado de envases proporciona una superficie reflectante útil para reducir las pérdidas por radiación. La combinación de estos materiales en capas permite actuar sobre los tres mecanismos de transferencia de manera simultánea.

La caja de cocción retenida constituye una aplicación de gran valor práctico. Consiste en un recipiente aislado en el que se coloca la olla después de un breve calentamiento inicial, de modo que la cocción continúa con el calor acumulado en el alimento. Esta técnica reduce el consumo de combustible y el tiempo de atención a la cocina, y resulta especialmente adecuada para preparaciones de cocción prolongada como granos, legumbres y sopas, habituales en la alimentación andina. Su construcción y evaluación se desarrollan en el caso presentado en la sección 5.5.2.

5.2.3. Aprovechamiento de fuentes energéticas disponibles

Las fuentes energéticas disponibles en el entorno incluyen la radiación solar, el viento, las corrientes de agua, la biomasa y el calor residual de otros procesos. Su aprovechamiento puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y de la red eléctrica, con beneficios económicos y ambientales. La viabilidad de cada fuente depende de su disponibilidad en el lugar, de su variabilidad a lo largo del día y del año, y de la existencia de tecnologías apropiadas para captarla y convertirla en la forma de energía requerida (Çengel et al., 2024).

La radiación solar constituye la fuente más ampliamente disponible y la más accesible para proyectos escolares. En la región andina ecuatoriana, la proximidad a la línea equinoccial y la altitud favorecen una radiación intensa a lo largo del año, aunque la nubosidad puede reducirla considerablemente en determinadas épocas y horas. Su aprovechamiento térmico, mediante colectores, cocinas y secadores solares, resulta generalmente más sencillo y económico que su conversión eléctrica mediante paneles fotovoltaicos, cuyo costo inicial es mayor. Medir la temperatura alcanzada por un colector sencillo en distintos días y horas permite al estudiante caracterizar el recurso solar de su propia localidad.

La biomasa residual, como los restos de cosecha, la leña de poda o los residuos orgánicos domésticos, representa otra fuente disponible en muchas comunidades. Su aprovechamiento eficiente requiere tecnologías que mejoren la combustión, como las cocinas mejoradas que reducen el consumo de leña y las emisiones de humo en el interior de las viviendas, o procesos de conversión como la digestión anaerobia para producir biogás. Estas tecnologías combinan beneficios energéticos, sanitarios y ambientales, y se relacionan con la gestión de residuos abordada en la sección 5.4.

5.2.4. Conversión de energía para usos específicos

Cada uso final de la energía requiere una forma específica: calor para cocinar o calentar agua, electricidad para iluminar o alimentar equipos, energía mecánica para bombear agua o mover herramientas. La conversión de la energía disponible en la forma requerida debe realizarse con el menor número de etapas posible, porque cada conversión introduce pérdidas. Calentar agua con electricidad obtenida de paneles solares, por ejemplo, implica dos conversiones con sus pérdidas respectivas, mientras que un colector solar térmico realiza una sola conversión directa (Çengel et al., 2024). Esta relación entre número de etapas y eficiencia global constituye un criterio sencillo para comparar propuestas.

La adecuación entre la fuente, la conversión y el uso constituye un criterio de diseño fundamental. Para usos térmicos de baja temperatura, como el calentamiento de agua para el aseo, la energía solar térmica resulta muy adecuada; para usos que requieren electricidad, como la iluminación o la carga de dispositivos, los paneles fotovoltaicos con baterías ofrecen una solución apropiada en lugares sin red. La energía química almacenada en pilas y baterías, estudiada en el Capítulo 2, permite disponer de electricidad en momentos y lugares donde la fuente primaria no está disponible (Atkins et al., 2023).

Los proyectos escolares pueden explorar conversiones de energía de complejidad variable. La construcción de un pequeño generador con imanes y bobinas convierte energía mecánica en eléctrica; una celda electroquímica con materiales accesibles transforma energía química en eléctrica; un colector solar con botellas plásticas convierte radiación en energía térmica. La medición de la energía obtenida en cada caso, comparada con la energía de entrada, permite calcular eficiencias y comprender las limitaciones de cada conversión, integrando la física, la química y la matemática.

5.2.5. Mejoras orientadas a un consumo eficiente

Las mejoras orientadas al consumo eficiente combinan cambios tecnológicos, como la sustitución de equipos o la incorporación de aislamiento, con cambios en los hábitos de uso, como apagar los equipos que no se utilizan o tapar las ollas durante la cocción. Los cambios de hábitos suelen tener un costo nulo y un efecto inmediato, mientras que los tecnológicos requieren inversión pero producen ahorros más estables. La combinación de ambos tipos de mejora ofrece los mejores resultados y debe planificarse según las posibilidades de cada hogar o institución. El registro del consumo mensual antes y después de las mejoras permite verificar su efecto real.

La sustitución de lámparas incandescentes por lámparas de diodos emisores de luz constituye un ejemplo de mejora tecnológica de rápido retorno, porque estas últimas producen la misma cantidad de luz con una fracción de la potencia eléctrica. La incorporación de aislamiento en los calentadores de agua, el uso de ollas de presión y la selección de recipientes de fondo plano adecuados al tamaño de la hornilla son mejoras de bajo costo que reducen significativamente el consumo. Cada una puede cuantificarse mediante mediciones antes y después de su aplicación.

La comunicación de las mejoras a la comunidad multiplica su efecto. Los estudiantes que cuantifican el ahorro obtenido con una medida sencilla pueden difundirlo mediante infografías, demostraciones o campañas escolares, lo que integra la dimensión comunicativa y artística del enfoque STEAM. Amanova et al. (2025) señalan que las propuestas STEAM buscan formar personas capaces de abordar los problemas de manera crítica y proponer soluciones, y la promoción del consumo eficiente constituye un ámbito en el que esta capacidad se traduce en beneficios tangibles para las familias.

5.3. Materiales y soluciones frente al deterioro

El deterioro de los materiales expuestos al ambiente genera pérdidas económicas, riesgos para la seguridad y residuos que podrían evitarse. Los metales se corroen, los polímeros se fragilizan con la radiación ultravioleta, la madera se degrada por la humedad y los organismos, y los materiales pétreos se desgastan por la acción del agua y de las variaciones de temperatura. Esta sección examina los procesos de degradación, la corrosión y sus factores, las barreras físicas de protección, los tratamientos químicos preventivos y la elección de alternativas según las condiciones de exposición (Callister y Rethwisch, 2022).

5.3.1. Procesos responsables de la degradación

Los procesos de degradación de los materiales pueden clasificarse en físicos, químicos y biológicos, aunque en la práctica suelen actuar de manera combinada. Los físicos incluyen el desgaste por fricción, la erosión por partículas transportadas por el viento o el agua, la fatiga por cargas repetidas y las tensiones generadas por ciclos de humedad y temperatura. Los químicos comprenden la corrosión de los metales, la oxidación de los polímeros, la hidrólisis y la disolución de minerales. Los biológicos se deben a la acción de hongos, bacterias, insectos y plantas (Callister y Rethwisch, 2022). Reconocer el tipo de proceso predominante constituye el primer paso para elegir una protección adecuada.

La radiación ultravioleta solar constituye un agente de degradación particularmente relevante para los polímeros. Su energía es suficiente para romper enlaces químicos en las cadenas poliméricas, lo que produce decoloración, pérdida de flexibilidad, agrietamiento y, en etapas avanzadas, fragmentación. Este proceso explica que los recipientes plásticos expuestos al sol se vuelvan quebradizos con el tiempo. En la región andina, la intensidad de la radiación ultravioleta,

favorecida por la altitud, acelera este tipo de degradación y exige atención especial en la selección de materiales para exteriores.

La interacción entre procesos puede acelerar el deterioro. Las fisuras producidas por ciclos térmicos permiten la entrada de agua, que a su vez favorece la corrosión de las armaduras metálicas del concreto o el crecimiento de hongos en la madera. La comprensión de estas interacciones permite diseñar estrategias de protección que actúen sobre varios procesos simultáneamente. El diagnóstico del deterioro de un objeto o estructura debe identificar, por tanto, no solo los síntomas visibles, sino los procesos que los originan y las condiciones que los favorecen.

5.3.2. Corrosión y factores que favorecen su aparición

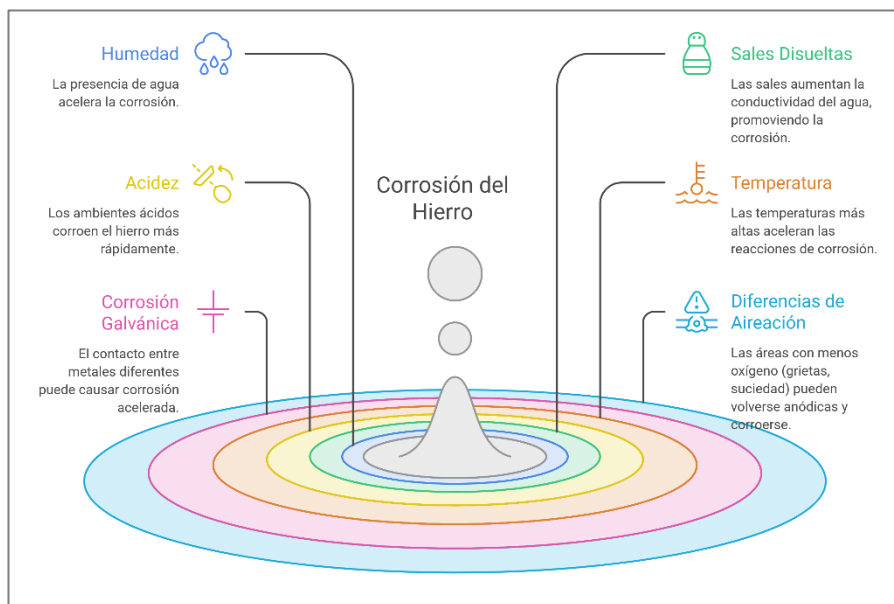
La corrosión de los metales es un proceso electroquímico en el que el metal actúa como ánodo y se oxida, mientras que en otra zona de la superficie, que actúa como cátodo, se reduce una especie presente en el medio, generalmente el oxígeno disuelto. El agua en contacto con el metal actúa como electrolito que cierra el circuito. En el caso del hierro, los productos de la corrosión forman el óxido hidratado conocido como herrumbre, que es poroso, se desprende y deja expuesta nueva superficie metálica al ataque (Overby y Chang, 2022). Comprender este mecanismo resulta indispensable para elegir una estrategia de protección eficaz.

Diversos factores favorecen la corrosión. La humedad proporciona el electrolito necesario; la presencia de sales, como el cloruro de sodio en ambientes costeros o en zonas donde se emplea sal en las vías, aumenta la conductividad del electrolito y acelera el proceso; la acidez del medio incrementa la velocidad de las reacciones; y la temperatura elevada acelera la cinética. El contacto entre metales distintos en presencia de un electrolito produce corrosión galvánica, en la que el

metal más activo se corroe preferentemente, según la serie electroquímica estudiada en el Capítulo 2.

Las heterogeneidades de la superficie metálica y del medio también favorecen la corrosión localizada. Las zonas con diferente acceso al oxígeno, como las grietas o las áreas cubiertas por suciedad, forman celdas de aireación diferencial en las que la zona menos oxigenada actúa como ánodo y se corroe con mayor intensidad. La Figura 17 representa los factores físicos y químicos asociados con los procesos de corrosión y constituye la base del caso presentado en la sección 5.5.5, dedicado a reducir el deterioro de materiales expuestos al ambiente.

Figura 17. Factores físicos y químicos asociados con los procesos de corrosión



Nota. Elaborada a partir de Overby y Chang (2022) y Callister y Rethwisch (2022).

La figura integra el mecanismo electroquímico de la corrosión con los factores que la favorecen, mostrando que cada factor actúa sobre algún componente de la celda de corrosión: el electrolito, las reacciones en el ánodo y el cátodo, o la diferencia de potencial entre zonas. Esta relación permite deducir las estrategias de protección: eliminar el electrolito mediante barreras, modificar las reacciones mediante inhibidores o invertir la polaridad mediante protección catódica. La figura ofrece así un marco explicativo que conecta la teoría electroquímica con decisiones prácticas de mantenimiento y diseño de estructuras metálicas.

5.3.3. Barreras físicas de protección

Las barreras físicas protegen el material interponiendo una capa que impide el contacto con los agentes agresivos del ambiente. Pueden ser orgánicas, como pinturas, barnices, aceites y ceras; inorgánicas, como esmaltes vitrificados y recubrimientos cerámicos; o metálicas, como los recubrimientos de zinc, estaño o níquel. Su eficacia depende de la impermeabilidad al agua y al oxígeno, de la adherencia al sustrato, del espesor y de la continuidad de la capa, porque cualquier discontinuidad puede convertirse en un punto de ataque concentrado (Callister y Rethwisch, 2022). La inspección periódica de la barrera permite detectar y reparar los defectos antes de que el deterioro avance.

La preparación de la superficie determina en gran medida la durabilidad de la barrera. Una pintura aplicada sobre una superficie con óxido, grasa o polvo se desprende con facilidad y permite que la corrosión continúe bajo la capa. Por ello, la limpieza, el lijado y, en su caso, la aplicación de una capa de imprimación constituye etapas indispensables. Las pinturas anticorrosivas incorporan pigmentos que actúan como inhibidores o como ánodos de sacrificio, combinando el efecto de barrera con mecanismos electroquímicos de protección.

Los recubrimientos metálicos presentan comportamientos distintos según su posición en la serie electroquímica respecto del metal protegido. El zinc, más activo que el hierro, lo protege incluso si el recubrimiento se raya, porque se corroe preferentemente como ánodo de sacrificio. El estaño, menos activo que el hierro, lo protege mientras la capa permanece intacta, pero acelera su corrosión si esta se daña, porque el hierro expuesto actúa como ánodo. Esta diferencia explica el uso del acero galvanizado en exteriores y de la hojalata en envases protegidos del ambiente (Overby y Chang, 2022).

5.3.4. Tratamientos químicos preventivos

Los tratamientos químicos preventivos modifican la superficie del material o el medio que lo rodea para reducir la velocidad de deterioro. La pasivación genera una capa de óxido compacta y adherente que protege al metal subyacente, como ocurre de manera natural en el aluminio y en el acero inoxidable, o de forma inducida mediante tratamientos específicos. El fosfatado del acero produce una capa de fosfatos que mejora la resistencia a la corrosión y la adherencia de las pinturas. El anodizado del aluminio engrosa electroquímicamente su capa natural de óxido (Callister y Rethwisch, 2022). Estos tratamientos suelen combinarse con barreras físicas para prolongar la protección.

Los inhibidores de corrosión son sustancias que, añadidas en pequeñas cantidades al medio, reducen la velocidad de corrosión. Pueden actuar sobre las reacciones anódicas, sobre las catódicas o formando películas protectoras sobre la superficie metálica. Diversos extractos vegetales ricos en compuestos orgánicos con átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre han mostrado capacidad inhibidora, lo que ha despertado interés por los inhibidores de origen natural como alternativa de menor toxicidad a algunos inhibidores sintéticos. La evaluación de estos extractos constituye una línea de investigación accesible para proyectos escolares. Su eficacia debe verificarse siempre mediante ensayos comparativos con muestras sin tratar.

La protección catódica constituye otro tratamiento preventivo de naturaleza electroquímica. Al conectar el metal que se desea proteger con un metal más activo, como el zinc o el magnesio, este último actúa como ánodo de sacrificio y se corroe en lugar del metal protegido. Este principio se aplica en cascos de embarcaciones, tuberías enterradas y calentadores de agua. Su demostración en el aula, mediante clavos de hierro conectados o no con una tira de zinc y sumergidos en agua salada, permite observar en pocos días la diferencia en el grado de corrosión.

5.3.5. Elección de alternativas según condiciones de exposición

La elección de la estrategia de protección depende de las condiciones de exposición del material, que determinan qué procesos de deterioro predominan y con qué intensidad. Un objeto de hierro en un interior seco requiere una protección mínima; el mismo objeto a la intemperie en una zona lluviosa necesita una barrera eficaz y mantenimiento periódico; y en un ambiente costero, con alta salinidad, puede requerir galvanizado, pinturas anticorrosivas o incluso la sustitución por un material más resistente, como el acero inoxidable o el aluminio (Callister y Rethwisch, 2022). Una elección ajustada a las condiciones reales evita tanto la protección insuficiente como el gasto innecesario.

La clasificación de los ambientes según su agresividad orienta la elección. Los factores principales son la humedad relativa y el tiempo de humectación de la superficie, la presencia de cloruros, la contaminación atmosférica por compuestos de azufre, la radiación ultravioleta y las variaciones de temperatura. En el Ecuador conviven ambientes muy distintos, desde la costa húmeda y salina hasta los valles andinos secos y la Amazonía de humedad elevada, por lo que una misma solución de protección no resulta igualmente adecuada en todas las regiones del país.

La valoración de las alternativas debe considerar, además de la eficacia, el costo inicial, la frecuencia y el costo del mantenimiento, la durabilidad esperada y el impacto ambiental de los productos empleados. Ashby (2021) destaca que prolongar la vida útil de los materiales constituye una estrategia de eficiencia material con beneficios ambientales significativos, porque evita la fabricación de reemplazos. Una protección adecuada puede multiplicar la vida útil de una estructura, con ahorros económicos y ambientales que superan ampliamente el costo de la protección.

5.4. Residuos como recursos para nuevas aplicaciones

Los residuos generados en los hogares, las escuelas, los mercados y las actividades agrícolas contienen materiales que pueden recuperarse y transformarse en productos útiles. Esta perspectiva, asociada con la economía circular, reduce la extracción de materias primas y la carga sobre los sistemas de disposición final. Kirchherr et al. (2023) encontraron que el desarrollo sostenible aparece cada vez más como la finalidad principal de la economía circular. Esta sección aborda la identificación de componentes recuperables, su separación y acondicionamiento, su transformación, la comprobación de las propiedades del producto y las posibilidades de aprovechamiento en el entorno.



5.4.1. Identificación de componentes recuperables

La identificación de los componentes recuperables parte de la caracterización de los residuos generados en un ámbito determinado. En las instituciones educativas predominan el papel, el cartón, los envases plásticos y los residuos orgánicos de alimentos; en los mercados, los residuos vegetales y de frutas; en las zonas agrícolas, los restos de cosecha como la cascarilla de arroz, el bagazo de caña o las cáscaras de cacao y banano. Cada tipo de residuo presenta componentes con potencial de recuperación distinto según su composición y sus propiedades (Ashby, 2021). Un inventario de los residuos generados durante una semana ofrece una base cuantitativa para decidir cuáles merecen atención prioritaria.

Los residuos orgánicos vegetales contienen celulosa, hemicelulosa, lignina, almidón, pectinas y otros compuestos que pueden aprovecharse. El almidón de las cáscaras de papa, yuca o banano verde puede extraerse para elaborar bioplásticos; las fibras de celulosa pueden emplearse como refuerzo en materiales compuestos o para fabricar papel; la biomasa en general puede carbonizarse para obtener adsorbentes o compostarse para producir abono. Purba et al. (2024) mostraron la viabilidad de obtener bioplásticos a partir del almidón de semillas de jaca, un residuo frutícola.

Los residuos plásticos y metálicos presentan otras posibilidades de recuperación. Los termoplásticos limpios y clasificados pueden fundirse y moldearse para obtener nuevos objetos; las latas de aluminio pueden recuperarse como materia prima de alto valor; y los cables en desuso contienen cobre que puede reutilizarse en proyectos electroquímicos. La identificación de estos componentes exige conocer sus propiedades y los métodos de clasificación presentados en el Capítulo 3, como las pruebas de densidad por flotación para distinguir los distintos tipos de plástico.

5.4.2. Separación y acondicionamiento de materiales

Una vez identificados los componentes recuperables, deben separarse de los demás y acondicionarse para su transformación. La separación en la fuente, realizada al momento de desechar los residuos, constituye la estrategia más eficaz, porque evita la contaminación cruzada entre materiales. Cuando los residuos llegan mezclados, se requieren métodos de separación basados en propiedades físicas como el tamaño, la densidad o el magnetismo, según se describió en el Capítulo 3 (Callister y Rethwisch, 2022). La colaboración de toda la comunidad educativa en la separación en la fuente resulta, por ello, una condición previa para cualquier proyecto de recuperación.

El acondicionamiento comprende las operaciones que preparan el material para su transformación: limpieza para eliminar restos de alimentos, tierra o etiquetas; secado para reducir el contenido de humedad; trituración o corte para obtener un tamaño de partícula adecuado; y, en su caso, tratamientos previos como el lavado con agua caliente o la inmersión en disoluciones que faciliten la extracción de un componente. La calidad del acondicionamiento influye directamente en la calidad del producto final y en la reproducibilidad del proceso. Un acondicionamiento deficiente suele explicar buena parte de la variabilidad observada entre lotes de un mismo producto.

En los proyectos escolares, el acondicionamiento de residuos orgánicos requiere atención a la higiene, porque estos materiales pueden descomponerse y favorecer el crecimiento de microorganismos. El secado al sol o en estufa a baja temperatura, el almacenamiento en recipientes cerrados y el procesamiento en plazos breves reducen estos riesgos. La documentación de las condiciones de acondicionamiento, como la temperatura y el tiempo de secado o el tamaño de partícula obtenido, permite relacionar después las propiedades del producto con las características de la materia prima utilizada.

5.4.3. Transformación para obtener nuevas funciones

La transformación convierte el material recuperado en un producto con una función nueva o renovada. Puede realizarse mediante procesos físicos, como la fusión y el moldeo de termoplásticos, el prensado de fibras o la aglomeración de partículas con aglutinantes, o mediante procesos químicos, como la carbonización y activación de biomasa, la extracción y plastificación de almidón o la saponificación de aceites usados. La elección del proceso depende del material de partida, de la función que se desea obtener y de los recursos disponibles (Overby y Chang, 2022). En todos los casos, el proceso elegido debe poder realizarse con seguridad en las instalaciones disponibles.

La elaboración de bioplásticos a partir de almidón recuperado ilustra una transformación química accesible. El almidón se dispersa en agua, se calienta con agitación hasta que sus gránulos se hinchan y gelifican, se añade un plastificante como la glicerina y, en algunos casos, un ácido débil como el vinagre, y la mezcla se extiende sobre una superficie lisa para su secado. Las proporciones de los componentes y las condiciones de calentamiento y secado determinan las propiedades de la película obtenida, que pueden mejorarse con aditivos como el quitosano (Purba et al., 2024).

La transformación de residuos en adsorbentes constituye otra alternativa con aplicaciones directas en el acondicionamiento del agua. La carbonización de cáscaras o cascarilla en ausencia parcial de oxígeno, seguida de un tratamiento de activación, produce un carbón con porosidad elevada. Décima (2024) empleó carbón vegetal activado con jugo de limón en un filtro casero y comprobó su eficacia con agua contaminada con tierra y restos vegetales. Esta aplicación enlaza la gestión de residuos con el desafío del agua abordado en la sección 5.1.

5.4.4. Comprobación de propiedades del producto resultante

Un producto obtenido a partir de residuos solo resulta útil si sus propiedades satisfacen los requerimientos de la función prevista. La comprobación de estas propiedades mediante ensayos sistemáticos resulta, por tanto, indispensable antes de declarar que el proceso de transformación ha tenido éxito. Los ensayos deben seleccionarse según la función: un bioplástico destinado a envolturas requiere ensayos de resistencia, flexibilidad y permeabilidad; un adsorbente, ensayos de capacidad de retención; un material de construcción, ensayos de resistencia a la compresión y a la humedad (Callister y Rethwisch, 2022). Sin esta verificación, el producto no puede recomendarse a los usuarios.

Los ensayos deben realizarse en condiciones controladas y compararse con un material de referencia, que puede ser un producto comercial equivalente o una versión anterior del material recuperado. Purba et al. (2024) evaluaron la resistencia a la tracción, la elongación y la biodegradabilidad de sus bioplásticos, y encontraron que ciertas formulaciones perdieron alrededor del 94 % de su masa en cinco días en las condiciones de ensayo. Estos resultados ilustran cómo la comprobación de propiedades permite comparar formulaciones y seleccionar la más adecuada para cada aplicación.

La comprobación debe incluir también las propiedades relacionadas con la seguridad y el impacto ambiental del producto. Un material destinado al contacto con alimentos o con agua para consumo no debe liberar sustancias nocivas; un producto destinado a exteriores debe resistir la radiación y la humedad; y cualquier producto debe poder gestionarse adecuadamente al final de su vida útil. La Tabla 20 presenta las propiedades que conviene comprobar para verificar la funcionalidad de los materiales recuperados, organizadas según el tipo de producto obtenido.

Tabla 20. *Propiedades para comprobar la funcionalidad de materiales recuperados*

Producto recuperado	Propiedades por comprobar	Ensayo sugerido en contextos escolares
Bioplástico de almidón	Resistencia a la tracción, flexibilidad, absorción de agua, biodegradabilidad	Tracción con dinamómetro, doblado repetido, inmersión en agua, entierro en suelo con control de masa
Carbón activado de biomasa	Capacidad de adsorción, liberación de partículas finas	Decoloración de una disolución de colorante, turbidez del agua filtrada
Papel reciclado	Resistencia al rasgado, uniformidad, absorción de tinta	Rasgado comparativo, observación a contraluz, prueba de escritura
Tablero de fibras aglomeradas	Resistencia a la flexión, estabilidad ante la humedad	Carga en el centro de una probeta apoyada, inmersión y medición del hinchamiento
Jabón de aceite usado	Alcalinidad residual, capacidad limpiadora	Medición del pH de una disolución, prueba de formación de espuma y limpieza
Objeto de termoplástico moldeado	Resistencia al impacto, estabilidad dimensional	Caída desde altura definida, medición tras exposición al calor

Nota. Elaborada a partir de Callister y Rethwisch (2022), Purba et al. (2024) y Décima (2024).

La tabla asocia cada producto recuperado con las propiedades que determinan su funcionalidad y con ensayos realizables en contextos escolares, lo que facilita la planificación de la etapa de comprobación. La inclusión de la alcalinidad residual en el jabón de aceite usado destaca un aspecto de seguridad fundamental, porque un exceso de hidróxido de sodio no reaccionado puede irritar la piel. Del mismo modo, la verificación de la liberación de partículas finas en el carbón

activado resulta necesaria antes de emplearlo en filtros. La tabla muestra que la comprobación debe atender tanto al desempeño como a la seguridad del producto.

5.4.5. Posibilidades de aprovechamiento en el entorno

El aprovechamiento de los materiales recuperados en el entorno inmediato cierra el ciclo de la economía circular a escala local. Los productos obtenidos pueden utilizarse en la propia institución educativa, como los filtros para el agua de lavado o los tableros para murales; distribuirse en la comunidad, como el jabón de aceite usado o las cajas de cocción retenida; o comercializarse en pequeña escala para financiar nuevos proyectos. Cada opción implica exigencias distintas de calidad, cantidad y regularidad de la producción (Kirchherr et al., 2023). Definir desde el inicio el destino del producto orienta los requerimientos de calidad del proceso.

La articulación con actores del entorno amplía las posibilidades de aprovechamiento. Los mercados pueden proporcionar residuos orgánicos de manera regular; los talleres y pequeñas industrias pueden aportar retazos de materiales; los gobiernos locales pueden apoyar la recolección diferenciada; y las organizaciones comunitarias pueden participar en la distribución de los productos. Estas alianzas convierten los proyectos escolares en iniciativas con impacto social, y ofrecen al estudiante experiencias de trabajo colaborativo con actores diversos que enriquecen su formación. La formalización de estas alianzas mediante acuerdos sencillos favorece su continuidad más allá de un año escolar.

La sostenibilidad de las iniciativas de aprovechamiento depende de su viabilidad técnica, económica y organizativa a largo plazo. Un proyecto que funciona durante un año escolar pero se abandona al cambiar el equipo de estudiantes deja escasos beneficios duraderos. La documentación de los procedimientos, la formación de nuevos

equipos y la institucionalización de las prácticas en la planificación escolar contribuyen a su continuidad. El currículo ecuatoriano vigente, con su enfoque interdisciplinario, ofrece un marco para integrar estas iniciativas en la planificación académica (Ministerio de Educación del Ecuador, 2021). La designación de responsables docentes estables facilita esta continuidad.

5.5. Casos de Proyectos Experimentales con Enfoque STEAM

Esta sección presenta cinco casos de proyectos experimentales que integran los contenidos desarrollados a lo largo del libro. Cada caso aborda uno de los desafíos del entorno examinados en este capítulo y se estructura según las etapas del proceso de diseño descritas en el Capítulo 4: identificación del problema, principios físico-químicos involucrados, materiales y procedimiento, evaluación y posibilidades de mejora. Los casos no constituyen recetas cerradas, sino propuestas que cada equipo debe adaptar a su contexto, sus recursos y las necesidades de su comunidad (Dieter y Schmidt, 2021; Yulianti et al., 2024). Su selección responde a la disponibilidad de los materiales en la mayoría de las instituciones educativas del país.



5.5.1. Sistema de filtración mediante materiales de distinta naturaleza

El primer caso responde a la necesidad de clarificar agua turbia, como la recolectada de la lluvia o captada de fuentes superficiales en época de precipitaciones. El requerimiento principal consiste en reducir la turbidez y el color del agua hasta obtener un líquido visualmente claro, empleando materiales accesibles y sin consumo de energía eléctrica. El sistema se concibe como una etapa previa a la desinfección, y no como un tratamiento completo, limitación que debe comunicarse explícitamente a los usuarios de acuerdo con el enfoque de barreras múltiples (Organización Mundial de la Salud, 2022). Este caso permite integrar los contenidos de separación de mezclas del Capítulo 2 con la valoración de alternativas del Capítulo 4.

El filtro se construye en un recipiente plástico recuperado, como un botellón de agua cortado en su base e invertido, con capas sucesivas de grava gruesa, grava fina, arena gruesa, arena fina y carbón activado separado por tela o algodón. Los principios involucrados son la separación por tamaño de partícula en las capas de grava y arena, y la adsorción de sustancias disueltas en el carbón activado. Todos los materiales deben lavarse previamente hasta que el agua de enjuague salga clara, y el carbón debe enjuagarse para eliminar el polvo fino (Décima, 2024).

La evaluación mide la turbidez y el color del agua antes y después de la filtración, el caudal obtenido y la evolución de estos parámetros con el uso. Una variante del proyecto compara filtros con distintos órdenes o espesores de capa, o con carbones de distinto origen, para determinar la configuración más eficaz. Las posibilidades de mejora incluyen la incorporación de una etapa previa de sedimentación, el uso de coagulantes naturales y la integración con un sistema de desinfección solar, lo que convierte el filtro en parte de un sistema más completo.

5.5.2. Dispositivo para mejorar la conservación de energía térmica

El segundo caso aborda el consumo de combustible en la cocción de alimentos que requieren tiempos prolongados, como los granos y las legumbres. La solución consiste en una caja de cocción retenida que permite continuar la cocción con el calor acumulado en la olla después de un breve calentamiento inicial. El requerimiento puede formularse, por ejemplo, como mantener el contenido de una olla por encima de una temperatura definida durante un tiempo establecido, con materiales recuperados y sin consumo adicional de energía (Çengel et al., 2024). El proyecto resulta especialmente pertinente en hogares que cocinan con gas licuado o con leña.

El dispositivo se construye con una caja de cartón o madera, un relleno aislante de papel arrugado, cascarilla de arroz, retazos textiles o espuma recuperada, un forro reflectante de papel de aluminio y una tapa bien ajustada con un burlete de tela. Los principios involucrados son la reducción de la conducción mediante el aislante, la limitación de la radiación mediante la superficie reflectante y la supresión de la convección mediante el cierre hermético. El diseño debe dejar un espacio interior ajustado a la olla para reducir el volumen de aire que debe calentarse.

La evaluación registra la temperatura del contenido de la olla a intervalos regulares, dentro de la caja y fuera de ella como referencia, y compara el consumo de gas o el tiempo de uso de la hornilla con y sin el dispositivo. La optimización puede seguir la secuencia de versiones descrita en la Tabla 18 del Capítulo 4, modificando una variable en cada versión. Las posibilidades de mejora incluyen la adaptación del diseño para conservar alimentos fríos y la elaboración de una guía de uso con recetas adaptadas para su difusión en la comunidad.

5.5.3. Aplicación electroquímica basada en materiales accesibles

El tercer caso propone construir una batería con materiales accesibles capaz de encender un diodo emisor de luz o alimentar un pequeño reloj digital, como demostración de la conversión de energía química en eléctrica. El requerimiento puede formularse en términos del voltaje y la corriente necesarios para el dispositivo elegido y del tiempo durante el cual debe mantenerlo en funcionamiento. El proyecto permite estudiar la influencia de los metales, el electrolito y la conexión de las celdas sobre el desempeño de la batería (Atkins et al., 2023). Su bajo costo permite que cada estudiante construya y ensaye sus propias celdas.

Cada celda se construye con un electrodo de zinc, como un clavo galvanizado o una lámina recuperada, un electrodo de cobre, como un trozo de cable pelado, y un electrolito, que puede ser jugo de limón, vinagre o una disolución de sal en agua. Las celdas se conectan en serie para sumar sus voltajes hasta alcanzar el valor requerido. Los principios involucrados son la diferencia de potencial entre los metales según la serie electroquímica, la conducción iónica en el electrolito y la conducción electrónica en el circuito externo, estudiados en el Capítulo 2.

La evaluación mide el voltaje en circuito abierto y bajo carga, la corriente suministrada y la evolución de ambos en el tiempo, lo que permite construir curvas de descarga. La comparación entre electrolitos, áreas de electrodo y distancias entre ellos identifica las variables que más influyen en el desempeño. Meedee y Yuenyong (2022) mostraron que la construcción de explicaciones sobre las celdas galvánicas mejora cuando se articulan los niveles macroscópico, submicroscópico y simbólico, por lo que el informe del proyecto debe incluir representaciones en los tres niveles.

5.5.4. Transformación de residuos en un material con nueva utilidad

El cuarto caso transforma residuos orgánicos ricos en almidón, como las cáscaras de papa, yuca o banano verde, en un bioplástico que pueda utilizarse como envoltura o recubrimiento biodegradable. El requerimiento combina propiedades mecánicas, como una flexibilidad y resistencia suficientes para la manipulación, con propiedades ambientales, como la biodegradabilidad en condiciones de compostaje. El proyecto integra la extracción de un componente de la biomasa, su transformación química y la comprobación de las propiedades del producto resultante (Purba et al., 2024). El proyecto conecta la química de los polímeros con la gestión de residuos y la reducción del uso de plásticos convencionales.

El procedimiento comienza con la extracción del almidón: las cáscaras limpias se trituran con agua, la mezcla se filtra a través de una tela y el líquido se deja reposar para que el almidón sedimente, tras lo cual se decanta y se seca. El almidón obtenido se dispersa en agua, se calienta con agitación hasta su gelificación, se añade glicerina como plastificante y la mezcla se extiende sobre una superficie lisa para su secado. Los principios involucrados son la separación por densidad, la gelificación del almidón y la acción plastificante de la glicerina.

La evaluación comprueba las propiedades indicadas en la Tabla 20 para los bioplásticos: resistencia a la tracción, flexibilidad, absorción de agua y biodegradabilidad. La variación sistemática de la proporción de glicerina permite estudiar su efecto sobre la flexibilidad y la resistencia, y la adición de fibras vegetales o de otros aditivos abre posibilidades de mejora de las propiedades mecánicas. El proyecto admite una dimensión artística mediante la incorporación de pigmentos naturales y el diseño de envases con formas y texturas propias.

5.5.5. Solución para reducir el deterioro de materiales expuestos al ambiente

El quinto caso aborda la corrosión de elementos de hierro expuestos al ambiente, como rejas, herramientas o estructuras metálicas de la institución educativa. El objetivo consiste en comparar distintas estrategias de protección y seleccionar la más adecuada según las condiciones de exposición del lugar. El requerimiento puede formularse como reducir el grado de corrosión observado en un período definido respecto de una muestra sin protección, con productos de baja toxicidad y costo accesible (Callister y Rethwisch, 2022). El proyecto aprovecha un problema visible en la mayoría de las instituciones y permite obtener resultados observables en pocas semanas.

El ensayo emplea clavos o láminas de hierro de igual tamaño, previamente lijados y desengrasados, divididos en grupos: sin protección, recubiertos con pintura, con aceite, con cera, conectados a una tira de zinc como ánodo de sacrificio y tratados con un extracto vegetal como posible inhibidor. Las muestras se exponen a condiciones controladas, como inmersión parcial en agua con sal, o a la intemperie en el lugar de uso. Los principios involucrados son el mecanismo electroquímico de la corrosión y las estrategias de barrera, inhibición y protección catódica (Overby y Chang, 2022).

La evaluación registra periódicamente el aspecto de las muestras mediante fotografías, la variación de su masa y, si es posible, la cantidad de óxido desprendido, y compara los resultados entre grupos. Al concluir el ensayo, las muestras deben limpiarse y los productos de corrosión disponerse de manera adecuada. La Tabla 21 resume los cinco proyectos experimentales presentados en esta sección, con el desafío que abordan, los principios físico-químicos involucrados, los materiales principales y los indicadores de evaluación, de modo que el

lector pueda compararlos y seleccionar el más adecuado para su contexto educativo.

Tabla 21. Comparación de los proyectos experimentales STEAM desarrollados

Proyecto	Desafío	Principios físico-químicos	Materiales principales	Indicadores de evaluación
Filtración de agua	Agua turbia	Separación por tamaño, adsorción	Grava, arena, carbón activado, envase recuperado	Turbidez, color, caudal
Conservación térmica	Consumo de combustible	Conducción, convección, radiación	Cartón, aislantes recuperados, papel de aluminio	Temperatura en el tiempo, ahorro de gas
Pila con materiales accesibles	Obtención de energía eléctrica	Reacciones redox, conducción iónica y electrónica	Zinc, cobre, limón o disolución salina	Voltaje, corriente, curva de descarga
Bioplástico de residuos	Residuos orgánicos	Separación por densidad, gelificación, plastificación	Cáscaras con almidón, glicerina, agua	Resistencia, flexibilidad, degradación en suelo
Protección contra la corrosión	Corrosión del hierro	Electroquímica de la corrosión, barreras, protección catódica	Clavos de hierro, pinturas, zinc, extractos vegetales	Aspecto, variación de masa, óxido formado

Nota. Elaborada a partir de los casos presentados en esta sección.

La tabla muestra que los cinco proyectos, aunque abordan desafíos distintos, comparten una estructura común basada en la identificación de un problema del entorno, la aplicación de principios físico-químicos definidos, el uso de materiales accesibles y la evaluación mediante indicadores medibles. Esta estructura común refleja el recorrido del libro, que va del principio científico a la solución funcional. Los proyectos pueden desarrollarse de manera independiente o combinarse: el carbón activado del proyecto de residuos puede alimentar el filtro de agua, y los aislantes recuperados pueden emplearse en el conservador térmico, generando sinergias que enriquecen la experiencia formativa.

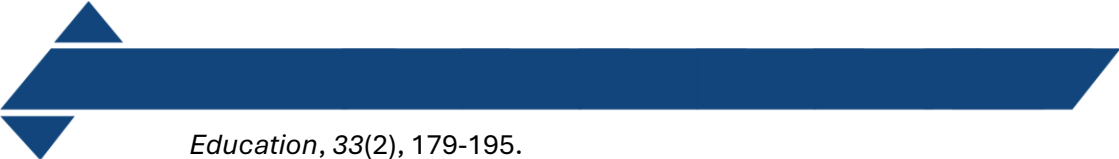
Bibliografía

- Aguilera, D., & Ortiz-Revilla, J. (2021). STEM vs. STEAM education and student creativity: A systematic literature review. *Education Sciences*, 11(7), 331. <https://doi.org/10.3390/educsci11070331>
- Ali, M., & Tse, A. W. C. (2023). Research trends and issues of engineering design process for STEM education in K-12: A bibliometric analysis. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 11(3), 695-727. <https://doi.org/10.46328/ijemst.2794>
- Amanova, A. K., Butabayeva, L. A., Abayeva, G. A., Umirbekova, A. N., Abildina, S. K., & Makhmetova, A. A. (2025). A systematic review of the implementation of STEAM education in schools. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(1), em2568. <https://doi.org/10.29333/ejmste/15894>
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F. (2021). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2018). *Atkins' physical chemistry* (11th ed.). Oxford University Press.
- Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2023). *Atkins' physical chemistry* (12th ed.). Oxford University Press.
- Bacich, L., & Holanda, L. (Orgs.). (2020). *STEAM em sala de aula: A aprendizagem baseada em projetos integrando conhecimentos na educação básica*. Penso.

- Belbase, S., Mainali, B. R., Kasemsukpipat, W., Tairab, H., Gochoo, M., & Jarrah, A. (2022). At the dawn of science, technology, engineering, arts, and mathematics (STEAM) education: Prospects, priorities, processes, and problems. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 53(11), 2919-2955.
<https://doi.org/10.1080/0020739X.2021.1922943>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2022). *Fundamentals of materials science and engineering: An integrated approach* (6th ed.). Wiley.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2024). *Thermodynamics: An engineering approach* (10th ed.). McGraw Hill.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill Education.
- Décima, S. (2024). Elaboración y evaluación de un filtro purificador de agua casero con carbón activado previamente preparado y su reproducción por estudiantes avanzados del nivel secundario. *Revista Tecnología y Ciencia*, (49), 14-36.
<https://doi.org/10.33414/rtyc.49.14-36.2024>
- Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2021). *Engineering design* (6th ed.). McGraw Hill.
- Hewitt, P. G. (2015). *Conceptual physics* (12th ed.). Pearson.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>

- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, Article 107001. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
- Marín-Marín, J. A., Moreno-Guerrero, A. J., Dúo-Terrón, P., & López-Belmonte, J. (2021). STEAM in education: A bibliometric analysis of performance and co-words in Web of Science. *International Journal of STEM Education*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s40594-021-00296-x>
- Martín-Páez, T., Aguilera, D., Perales-Palacios, F. J., & Vílchez-González, J. M. (2019). What are we talking about when we talk about STEM education? A review of literature. *Science Education*, 103(4), 799-822. <https://doi.org/10.1002/sce.21522>
- Meedee, C., & Yuenyong, C. (2022). Examining senior high school students' ability in constructing scientific explanation of galvanic cell. *International Journal of Science Education and Teaching*, 1(2), 96-120. <https://doi.org/10.14456/ijset.2022.10>
- Ministerio de Educación del Ecuador. (2016). *Currículo de los niveles de educación obligatoria*. Ministerio de Educación del Ecuador.
- Ministerio de Educación del Ecuador. (2021). *Currículo priorizado con énfasis en competencias comunicacionales, matemáticas, digitales y socioemocionales: Nivel de Bachillerato*. Ministerio de Educación del Ecuador.
- Naciones Unidas. (2023). *Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS)* (10th rev. ed.). United Nations.

- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization.
- Ortiz-Revilla, J., Adúriz-Bravo, A., & Greca, I. M. (2020). A framework for epistemological discussion on integrated STEM education. *Science & Education*, 29(4), 857-880.
<https://doi.org/10.1007/s11191-020-00131-9>
- Ortiz-Revilla, J., Greca, I. M., & Meneses-Villagr , J.  . (2021). Effects of an integrated STEAM approach on the development of competence in primary education students. *Journal for the Study of Education and Development (Infancia y Aprendizaje)*, 44(4), 838-870. <https://doi.org/10.1080/02103702.2021.1925473>
- Overby, J., & Chang, R. (2022). *Chemistry* (14th ed.). McGraw Hill.
- Perignat, E., & Katz-Buonincontro, J. (2019). STEAM in practice and research: An integrative literature review. *Thinking Skills and Creativity*, 31, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.10.002>
- Purba, E. Y. C., Hernani, & Supriatna, A. (2024). Bioplastic from jackfruit seed starch and its potency for education for sustainable development (ESD) in chemistry learning. *EduChemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*, 9(1), 1-19.
<https://doi.org/10.30870/educhemia.v9i1.25426>
- Quigley, C. F., Herro, D., & Jamil, F. M. (2017). Developing a conceptual model of STEAM teaching practices. *School Science and Mathematics*, 117(1-2), 1-12.
<https://doi.org/10.1111/ssm.12201>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (10th ed.). Cengage Learning.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry “triplet”. *International Journal of Science*



Education, 33(2), 179-195.

<https://doi.org/10.1080/09500690903386435>

Yulianti, E., Suwono, H., Abd Rahman, N. F., & Phang, F. A. (2024). State-of-the-art of STEAM education in science classrooms: A systematic literature review. *Open Education Studies*, 6(1), 20240032. <https://doi.org/10.1515/edu-2024-0032>

El libro Física y Química para la Innovación STEAM aborda la integración de la física y la química con el enfoque STEAM como una alternativa para desarrollar aprendizajes científicos vinculados con la experimentación, la innovación y la resolución de problemas. La obra propone que los conocimientos científicos trasciendan la comprensión teórica y puedan aplicarse al análisis de fenómenos cotidianos y situaciones reales, mediante experiencias que articulen ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas. Desde esta perspectiva, el aprendizaje se desarrolla a través de la observación, la formulación de preguntas, la experimentación y la búsqueda de soluciones fundamentadas.

A lo largo del texto se presentan proyectos experimentales orientados a fortalecer la comprensión de conceptos y principios de física y química mediante actividades prácticas. Se destacan procesos relacionados con la formulación de hipótesis, el diseño experimental, la medición, la recopilación y análisis de datos, la interpretación de resultados y la elaboración de conclusiones. Estas experiencias permiten que los estudiantes desarrollen habilidades de pensamiento científico, resolución de problemas y trabajo colaborativo, al mismo tiempo que establecen conexiones entre los contenidos académicos y las aplicaciones de la ciencia y la tecnología en diferentes contextos.

Finalmente, la obra resalta el papel de la innovación educativa para convertir el conocimiento científico en propuestas y soluciones frente a desafíos concretos. El enfoque STEAM favorece la creatividad, el pensamiento crítico, la investigación y la capacidad de diseñar, probar y mejorar alternativas a partir de evidencias. En conjunto, el libro constituye una propuesta pedagógica que busca fortalecer la formación científica mediante proyectos experimentales interdisciplinarios, promoviendo un aprendizaje activo y significativo en el que los estudiantes participan en la construcción y aplicación del conocimiento.