Choques e impulso

Fuerzas, cantidad de movimiento y energía (A2)

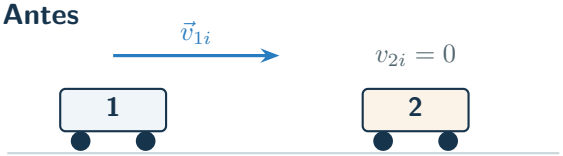
De la interacción al balance del sistema

1 / QUÉ SUCEDE DURANTE UN CHOQUE

El contacto es una interacción que dura un tiempo

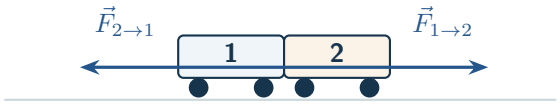
Dos carritos se aproximan sobre una pista horizontal. Al tocarse, sus superficies o sus parachoques se deforman y cada carrito ejerce una fuerza sobre el otro. El contacto ocupa un intervalo Δt: la fuerza suele aumentar y después disminuir hasta desaparecer.

Antes



El carrito 1 se acerca. Todavía no hay fuerza de contacto entre los carritos.

Durante



Se deforman los parachoques. Las fuerzas son iguales y opuestas, y cambian con el tiempo.

Después



Al separarse, cesa la fuerza de contacto. Se muestra un resultado elástico posible para masas iguales.

Se representan solo las fuerzas horizontales de contacto. Los pesos y las normales se equilibran verticalmente; se desprecia el rozamiento. Las flechas de fuerza parten del punto de contacto y actúan sobre carritos diferentes. Las velocidades se dibujan encima de los cuerpos.

Fuerzas iguales; cambios de velocidad que pueden ser distintos

Llamamos $\vec{F}_{2\to1}$ a la fuerza del carrito 2 sobre el 1. La tercera ley de Newton se cumple **en cada instante** del contacto:

$$\boxed{\vec{F}_{2\to1}(t) = -\vec{F}_{1\to2}(t)}.$$

Estas fuerzas tienen igual módulo y sentidos opuestos. **No se cancelan en el balance de fuerzas de un carrito**, porque cada una actúa sobre un cuerpo distinto. Para cada carrito, si el contacto es su única fuerza horizontal,

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{2\to1}}{m_1}, \qquad \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{1\to2}}{m_2}.$$

Si las masas son diferentes, las aceleraciones tienen módulos diferentes: el carrito de menor masa experimenta la mayor aceleración.

Un choque cambia las velocidades mediante fuerzas de contacto. Para comprender el cambio completo hay que tener en cuenta tanto la fuerza como el tiempo durante el que actúa.

2 / CANTIDAD DE MOVIMIENTO E IMPULSO

Una fuerza durante un tiempo cambia $\vec{p}$

La **cantidad de movimiento** de un cuerpo de masa m y velocidad $\vec{v}$ es

$$\boxed{\vec{p} = m\vec{v}}, \qquad [p] = \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}.$$

Es vectorial: tiene la dirección y el sentido de la velocidad. En una recta elegimos un eje y trabajamos con componentes con signo: $p_x = mv_x$. En lo que sigue, la derecha es positiva; por ejemplo, $m = 1\,\mathrm{kg}$ y $v_x = -2\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ dan $p_x = -2\,\mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$.

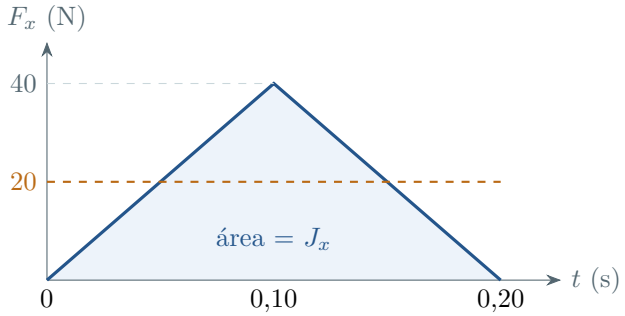
De la segunda ley al impulso resultante

Para masa constante, $\vec{F}_{\mathrm{res}} = m\,\mathrm{d}\vec{v}/\mathrm{d}t = \mathrm{d}\vec{p}/\mathrm{d}t$. Al sumar el efecto de la fuerza durante todo el intervalo se obtiene el **impulso resultante**:

$$\boxed{\vec{J} = \vec{F}_{\mathrm{res,media}}\,\Delta t = \Delta\vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i}.$$

La fuerza media es la fuerza constante que produciría el mismo impulso en el mismo tiempo. No es, en general, el valor máximo de la fuerza.

$$[J] = \mathrm{N\,s} = \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}.$$



Una fuerza variable

La fuerza sube y baja. El rectángulo de altura $F_{x,\mathrm{media}} = 20\,\mathrm{N}$ tiene la misma área que el triángulo.

$F_{x,\mathrm{media}}\,\Delta t = J_x$

Modelo triangular del contacto: se representa $F_{1\to2,x}$. La media es la mitad del máximo solo por la forma triangular elegida. El impulso del contacto sobre el carrito 1 tendría el mismo módulo y signo negativo.

Leer el área con su signo

En una gráfica F_x–t, el **área algebraica** entre la curva y el eje temporal es J_x: por encima del eje es positiva y por debajo es negativa. Para una fuerza variable, esto se escribe $J_x = \int_{t_i}^{t_f} F_x(t)\,\mathrm{d}t$.

En el gráfico, $\Delta t = 0{,}20\,\mathrm{s}$ y $F_{\mathrm{máx}} = 40\,\mathrm{N}$:

$$J_x = \tfrac{1}{2}(0{,}20)(40) = +4\,\mathrm{N\,s} = \Delta p_x.$$

El impulso mide un cambio de cantidad de movimiento. Si analizamos un solo cuerpo, debemos sumar los impulsos de todas las fuerzas que actúan sobre él.

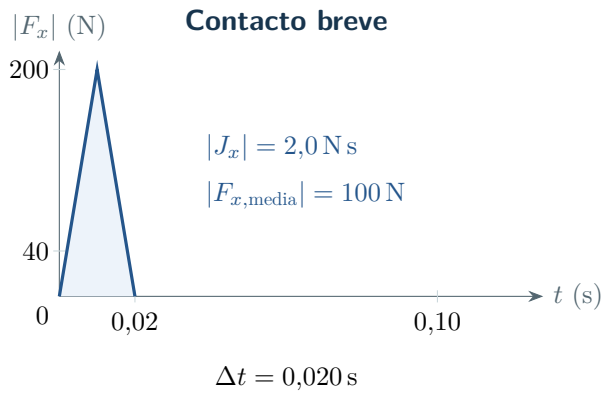
3 / LA DURACIÓN DEL CONTACTO

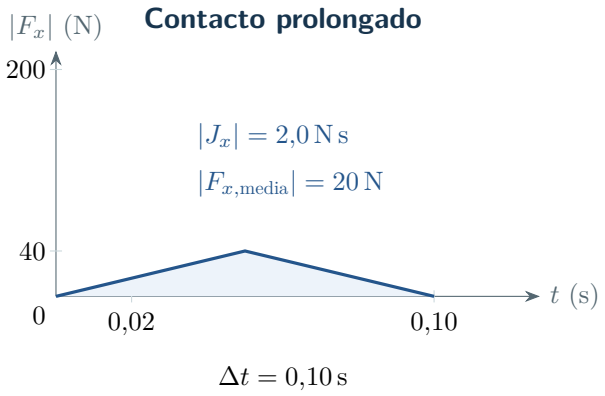
El mismo impulso puede producirse con fuerzas distintas

Detenemos una pelota de 0,20 kg que llega con $v_{x,i} = +10\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. En ambos casos acaba en reposo. Así, **el cambio de cantidad de movimiento es el mismo**:

$$\Delta p_x = m(v_{x,f} - v_{x,i}) = 0{,}20(0 - 10) = -2{,}0\,\mathrm{kg\,m\,s^{-1}}.$$

Comparamos la componente horizontal de la fuerza resultante. Su impulso es negativo; para comparar tamaños de áreas, dibujamos su módulo durante la frenada.





Las dos gráficas usan las mismas escalas. Las áreas triangulares son iguales: $|J_x| = 2{,}0\,\mathrm{N\,s}$. Las fuerzas máximas son 200 N y 40 N; las fuerzas medias, 100 N y 20 N. Son perfiles idealizados.

Acompañar la pelota con las manos permite detenerla durante más tiempo. Para el mismo Δp_x, una duración cinco veces mayor requiere una fuerza media de módulo cinco veces menor:

$$\boxed{|F_{\mathrm{res,media},x}| = \frac{|\Delta p_x|}{\Delta t}}.$$

La comparación exige mantener la misma velocidad inicial y la misma velocidad final. Si la pelota rebota, su cambio de cantidad de movimiento puede ser mayor.

Dos áreas, dos preguntas físicas diferentes

La idea de un área bajo una gráfica también aparece al estudiar el trabajo. Pero **la magnitud del eje horizontal cambia el significado del área**:

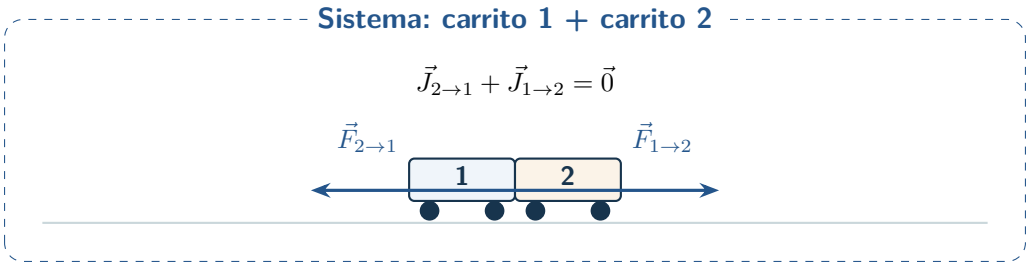
Fuerza frente a tiempo	**Fuerza frente a desplazamiento**
$J_x = \int F_x\,\mathrm{d}t = \Delta p_x$	$W = \int F_x\,\mathrm{d}x$ en una recta
Área en N s: **impulso**.	Área en N m = J: **trabajo**.
Relaciona fuerza y cambio de $\vec{p}$.	Si es el trabajo de la resultante, $W = \Delta E_c$.

Alargar el contacto reduce la fuerza media si el impulso se mantiene. El área fuerza–tiempo informa sobre cantidad de movimiento; el área fuerza–desplazamiento informa sobre energía transferida mediante trabajo.

4 / ELEGIR EL SISTEMA

¿Por qué se conserva la cantidad de movimiento?

El carrito 1 y el carrito 2 cambian su cantidad de movimiento durante el contacto. Ahora elegimos como sistema **el conjunto de los dos carritos**: las fuerzas que se ejercen mutuamente pasan a ser internas.



Los impulsos internos se compensan al sumar los dos cuerpos.

La línea discontinua delimita el sistema. Las dos fuerzas de contacto son internas. El peso y la normal de cada carrito son externos, pero se equilibran verticalmente; suponemos despreciable el impulso externo horizontal durante el choque.

Sumar los cambios de ambos cuerpos

Como las fuerzas internas son iguales y opuestas durante **el mismo intervalo**, sus impulsos también lo son. Si el impulso externo sobre cada carrito es despreciable,

$$\Delta\vec{p}_1 = \vec{J}_{2\to1}, \qquad \Delta\vec{p}_2 = \vec{J}_{1\to2} = -\vec{J}_{2\to1}.$$

Por tanto, $\Delta\vec{p}_1 = -\Delta\vec{p}_2$ y

$$\Delta\vec{p}_{\text{total}} = \Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 = \vec{0}.$$

En general, la suma de los impulsos internos es cero; el cambio de cantidad de movimiento del sistema depende del **impulso externo neto**:

$$\boxed{\Delta\vec{p}_{\text{total}} = \vec{J}_{\text{ext}}}.$$

Si $\vec{J}_{\text{ext}} \simeq \vec{0}$, entonces

$$\boxed{\vec{p}_{1i} + \vec{p}_{2i} = \vec{p}_{1f} + \vec{p}_{2f}}.$$

En una dimensión: conservar la suma con signos

Al proyectar sobre un eje fijo, con v_{1i}, v_{2i}, v_{1f} y v_{2f} como **componentes con signo**,

$$\boxed{m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}}.$$

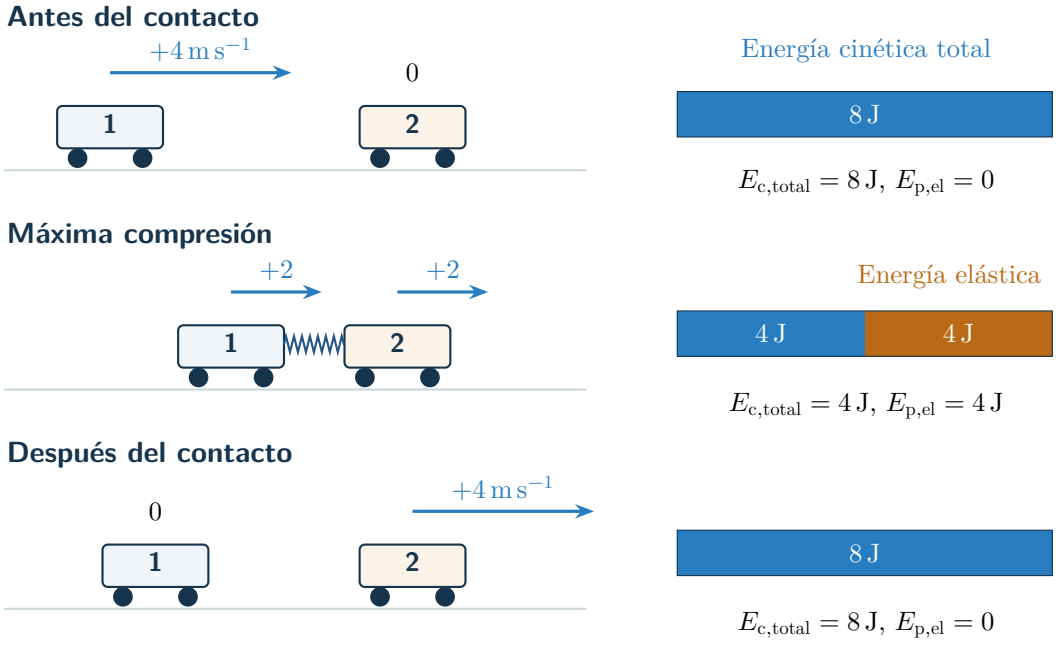
Por ejemplo, dos carritos de $1\,\text{kg}$ parten con $v_{1i} = +4\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$ y $v_{2i} = 0$. Si acaban con $v_{1f} = +1$ y $v_{2f} = +3\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$, los cambios son $\Delta p_1 = -3$ y $\Delta p_2 = +3\,\text{kg}\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$. La suma se mantiene en $+4\,\text{kg}\,\text{m}\,\text{s}^{-1}$.

La cantidad de movimiento de cada carrito puede cambiar mientras la del conjunto se conserva. La condición es que el impulso externo neto sobre el sistema sea despreciable durante el choque.

5 / LA ENERGÍA DURANTE EL CONTACTO

Deformar permite almacenar y transformar energía

Imaginemos que los carritos llevan un parachoques que se comporta como un **muelle ideal**. Al comprimirse, aumenta la energía potencial elástica, $E_{\mathrm{p,el}} = \frac{1}{2}kx^2$, a costa de la energía cinética de los carritos. Al recuperar su forma, el muelle puede devolver esa energía al movimiento.



Choque elástico ideal, $m_1 = m_2 = 1\,\mathrm{kg}$ y muelle de masa despreciable. En la máxima compresión ambos carritos llevan momentáneamente la misma velocidad: el muelle deja de comprimirse, aunque el conjunto sigue avanzando. Velocidades en $\mathrm{m\,s^{-1}}$; barras de energía en la misma escala.

«Elástico» compara el estado anterior con el posterior

En este ejemplo, $E_{\mathrm{c,total}}$ pasa de 8 J a 4 J durante la compresión y vuelve a 8 J al terminar el contacto. En el instante de máxima compresión, los otros 4 J están almacenados en el muelle. **La energía cinética total no tiene por qué ser constante durante el choque elástico**:

$$E_{\mathrm{c,total}} + E_{\mathrm{p,el}} = 8\,\mathrm{J} \qquad \text{en este modelo ideal.}$$

Tampoco se conserva la energía cinética de cada carrito por separado: el primero puede ceder toda su energía cinética al segundo.

Cuando la deformación no devuelve toda la energía

En los choques reales parte de la energía puede acabar como **energía interna**, vibraciones, sonido o deformación permanente. Si al terminar el choque queda menos energía cinética total que antes, el choque es inelástico.

La energía total se conserva también en un choque inelástico. Lo que disminuye es la energía cinética total de los cuerpos; la energía se transforma o se transfiere a otras formas.

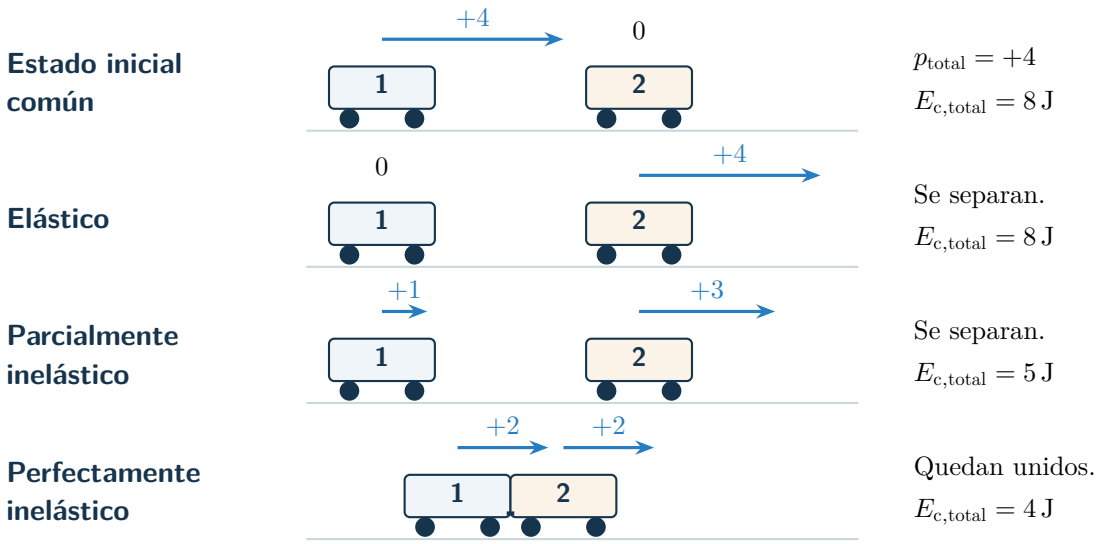
Si el sonido se propaga fuera de los carritos, transporta energía al entorno. El balance de energía total debe incluir esa transferencia o ampliar el sistema. La conservación de cantidad de movimiento exige, además, comprobar el impulso externo.

6 / UNA MISMA SITUACIÓN INICIAL

Tres resultados posibles, tres balances de energía

En los tres casos, $m_1 = m_2 = 1\,\text{kg}$, $v_{1i} = +4\,\text{m s}^{-1}$ y $v_{2i} = 0$. Se desprecia el impulso externo. El estado inicial es el mismo; cambiamos las características del contacto. **Los resultados son alternativas, no etapas sucesivas.**

$$p_{\text{total}} = +4\,\text{kg m s}^{-1}, \qquad E_{\text{c,total},i} = \tfrac{1}{2}(1)(4)^2 = 8\,\text{J}.$$



Velocidades en m s^{-1}; cantidad de movimiento en kg m s^{-1}.

La derecha es positiva y todas las flechas de velocidad usan la misma escala. Los cuerpos en reposo no llevan flecha. En el último caso los carritos permanecen unidos.

Resultado	p_{total} (kg m s^{-1})	$E_{\text{c,total}}$ (J)	Disminución de $E_{\text{c,total}}$
Elástico	$+4$	$8 \to 8$	$0\,\text{J}$
Parcialmente inelástico	$+4$	$8 \to 5$	$3\,\text{J}$
Perfectamente inelástico	$+4$	$8 \to 4$	$4\,\text{J}$

La cantidad de movimiento no basta para fijar el resultado

Los tres estados finales dan $p_{\text{total}} = +4\,\text{kg m s}^{-1}$. Para la energía cinética se suman **cuadrados de rapideces**: $E_{\text{c,total}} = \tfrac{1}{2}m_1v_{1f}^2 + \tfrac{1}{2}m_2v_{2f}^2$. Así, en el caso parcial, $\tfrac{1}{2}(1)^2 + \tfrac{1}{2}(3)^2 = 5\,\text{J}$.

Si quedan unidos, comparten v_f y

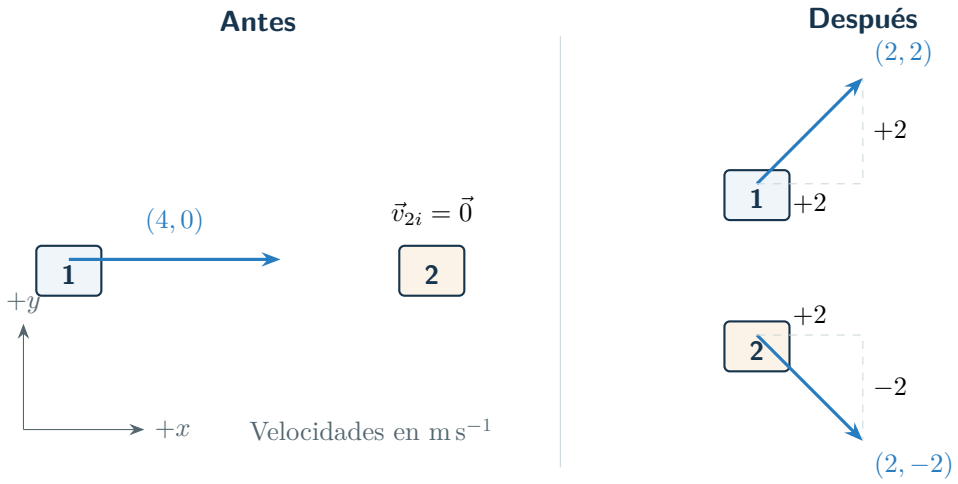
$$v_f = \frac{m_1v_{1i} + m_2v_{2i}}{m_1 + m_2} = \frac{4}{2} = +2\,\text{m s}^{-1}, \qquad E_{\text{c,total},f} = \tfrac{1}{2}(2)(2)^2 = 4\,\text{J}.$$

«Inelástico» engloba tanto el caso parcialmente inelástico (se separan y disminuye $E_{\text{c,total}}$) como el perfectamente o totalmente inelástico (quedan unidos). Quedar unidos no significa quedar en reposo ni perder toda la energía cinética.

7 / NIVEL SUPERIOR · CHOQUES EN DOS DIMENSIONES

Conservar el vector exige conservar sus componentes

En una mesa horizontal, dos carritos de 1 kg chocan con impulso externo horizontal despreciable. El primero llega con $\vec{v}_{1i} = (4, 0)\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ y el segundo está en reposo. Tras el contacto se mide $\vec{v}_{1f} = (2, 2)\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Calculamos la velocidad del segundo **por componentes**.



Vista superior; se omiten las fuerzas. Las flechas azules representan velocidades con la misma escala en los dos paneles. Las líneas discontinuas indican sus componentes. La colocación de los carritos en el panel final es esquemática: no representa una escala de tiempos ni de distancias recorridas.

Eje x: derecha positiva

$$m_1 v_{1i,x} + m_2 v_{2i,x} = m_1 v_{1f,x} + m_2 v_{2f,x}$$

$$1(4) + 1(0) = 1(2) + 1 v_{2f,x} \quad \Longrightarrow \quad \boxed{v_{2f,x} = +2\,\mathrm{m\,s^{-1}}}.$$

Eje y: arriba positivo

$$m_1 v_{1i,y} + m_2 v_{2i,y} = m_1 v_{1f,y} + m_2 v_{2f,y}$$

$$1(0) + 1(0) = 1(2) + 1 v_{2f,y} \quad \Longrightarrow \quad \boxed{v_{2f,y} = -2\,\mathrm{m\,s^{-1}}}.$$

Por tanto, $\vec{v}_{2f} = (2, -2)\,\mathrm{m\,s^{-1}}$: apunta 45° por debajo de $+x$. Su rapidez es $|\vec{v}_{2f}| = \sqrt{2^2 + (-2)^2} = 2\sqrt{2}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$.

Comprobar también la energía permite clasificar el choque

La suma vectorial final es $\vec{p}_{\mathrm{total},f} = (2, 2) + (2, -2) = (4, 0)\,\mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$, igual a la inicial. Además,

$$E_{\mathrm{c,total},f} = \tfrac{1}{2}(1)(2^2 + 2^2) + \tfrac{1}{2}(1)\big(2^2 + (-2)^2\big) = 8\,\mathrm{J} = E_{\mathrm{c,total},i}.$$

Este resultado es elástico. En dos dimensiones se conservan por separado las componentes de la cantidad de movimiento; las rapideces no se suman como si fueran vectores.