

# Vetores

Pedro H A Konzen

6 de fevereiro de 2024

# Licença

Este trabalho está licenciado sob a Licença Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional Creative Commons. Para visualizar uma cópia desta licença, visite [http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt\\_BR](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt_BR) ou mande uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

# Prefácio

Nestas notas de aula são abordados tópicos sobre vetores no espaço euclidiano. Como ferramentas computacionais de apoio, exploramos o [Geogebra](#) e códigos [Python](#).

Agradeço a todos e todas que de modo assíduo ou esporádico contribuem com correções, sugestões e críticas. :)

Pedro H A Konzen

# Conteúdo

<b>Capa</b>	<b>i</b>
<b>Licença</b>	<b>ii</b>
<b>Prefácio</b>	<b>iii</b>
<b>Sumário</b>	<b>v</b>
<b>1 Vetores</b>	<b>1</b>
1.1 Segmentos orientados . . . . .	1
1.1.1 Segmento . . . . .	1
1.1.2 Segmento orientado . . . . .	2
1.2 Vetor . . . . .	8
1.2.1 Adição de vetores . . . . .	10
1.2.2 Vetor oposto . . . . .	11
1.2.3 Subtração de vetores . . . . .	12
1.2.4 Multiplicação de vetor por um escalar . . . . .	13
1.2.5 Resumo das propriedades das operações com vetores . . . . .	15
<b>2 Bases e coordenadas</b>	<b>22</b>
2.1 Combinação linear . . . . .	22
2.2 Dependência linear . . . . .	26
2.2.1 Observações . . . . .	27
2.3 Bases e coordenadas . . . . .	33
2.3.1 Operações de vetores com coordenadas . . . . .	34
2.3.2 Dependência linear . . . . .	37
2.3.3 Bases ortonormais . . . . .	39
2.4 Mudança de base . . . . .	43

<i>CONTEÚDO</i>	v
<b>3 Produto escalar</b>	<b>50</b>
3.1 Produto escalar . . . . .	50
3.1.1 Propriedades do produto escalar . . . . .	50
3.2 Ângulo entre dois vetores . . . . .	56
3.2.1 Desigualdade triangular . . . . .	58
3.2.2 Exercícios resolvidos . . . . .	59
3.3 Projeção ortogonal . . . . .	60
<b>4 Produto vetorial</b>	<b>64</b>
4.1 Definição . . . . .	65
4.1.1 Interpretação geométrica . . . . .	65
4.1.2 Produto vetorial via coordenadas . . . . .	66
4.2 Propriedades do produto vetorial . . . . .	68
<b>5 Produto misto</b>	<b>75</b>
5.1 Definição e propriedades . . . . .	75
5.1.1 Interpretação geométrica . . . . .	76
5.1.2 Propriedades . . . . .	78
<b>Respostas dos Exercícios</b>	<b>81</b>

# Capítulo 1

## Vetores

Neste capítulo, introduzimos os conceitos fundamentais relacionados às definições de vetor e operações básicas envolvendo vetores.

### 1.1 Segmentos orientados

#### 1.1.1 Segmento

► Vídeo disponível!

Sejam dois pontos  $A$  e  $B$  sobre uma reta  $r$ . O conjunto de todos os pontos de  $r$  entre  $A$  e  $B$  é chamado de **segmento** e denotado por  $AB$ . A reta  $r$  é chamada de reta suporte.

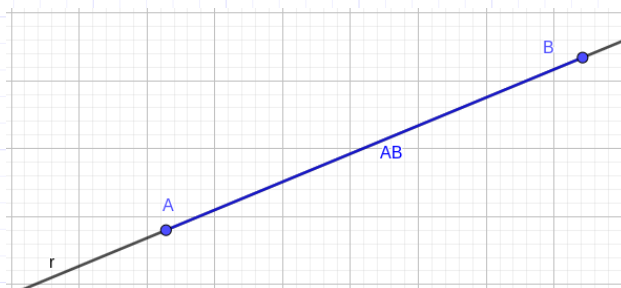


Figura 1.1: Esboço de um segmento  $AB$ .

### Norma e direção

Associado a um segmento  $AB$ , temos sua **norma** a qual é denotada por  $|AB|$  e é definida como a distância entre seus pontos extremos  $A$  e  $B$ . Ou seja, a norma do segmento  $AB$  é a medida de seu comprimento ou tamanho.

A **direção** de um segmento  $AB$  é a direção de sua reta suporte, i.e. a direção da reta que fica determinada pelos pontos  $A$  e  $B$ . Logo, dois segmentos  $AB$  e  $CD$  têm a mesma direção, quando suas retas suportes são paralelas ou coincidentes (ou seja, elas têm a mesma direção).

**Exemplo 1.1.1.** Consideremos os segmentos esboçados na Figura 1.2. Os segmentos  $AB$  e  $CD$  têm as mesmas direções, mas comprimentos diferentes. Já, o segmento  $EF$  tem direção diferente dos segmentos  $AB$  e  $CD$ .

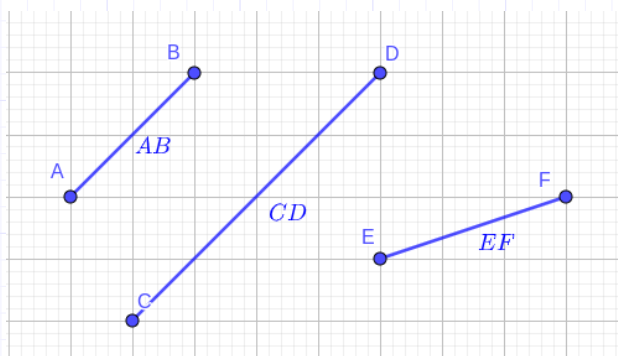


Figura 1.2: Esboço referente ao Exemplo 1.1.1.

### Segmento nulo

Se  $A$  e  $B$  são pontos coincidentes, então chamamos  $AB$  de **segmento nulo** e temos  $|AB| = 0$ . Observamos que a representação geométrica de um segmento nulo é um ponto, tendo em vista que seus pontos extremos são coincidentes. Como existem infinitas retas de diferentes direções que passam por um único ponto, temos que segmentos nulos não têm direção definida.

### 1.1.2 Segmento orientado

► Vídeo disponível!

Observamos que um dado segmento  $AB$  é igual ao segmento  $BA$ . Agora, podemos associar a noção de **sentido** a um segmento, escolhendo um dos

pontos como sua **origem** (ou **ponto de partida**) e o outro como sua **extremidade** (ou **ponto de chegada**). Ao fazermos isso, definimos um **segmento orientado**.

Mais precisamente, um segmento orientado  $AB$  é o segmento definido pelos pontos  $A$  e  $B$ , sendo  $A$  o ponto de partida (origem) e  $B$  o ponto de chegada (extremidade). Veja a Figura 1.3.

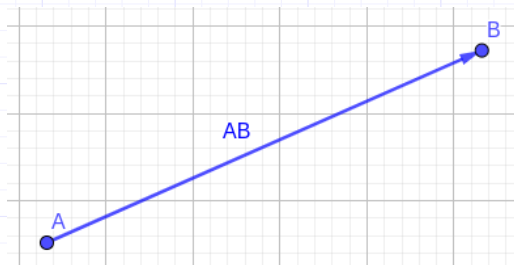


Figura 1.3: Esboço de um segmento orientado  $AB$ .

### Norma e direção

As noções de norma e de direção para segmentos estendem-se diretamente a segmentos orientados. Dizemos que dois dados segmentos orientados não nulos  $AB$  e  $CD$  têm a **mesma direção** quando as retas  $AB$  e  $CD$  são paralelas ou coincidentes. A norma de um segmento orientado  $AB$  é a norma do segmento  $AB$ , denotada por  $|AB|$ . O segmento orientado nulo  $AA$  tem norma  $|AA| = 0$  e não tem direção definida.

**Exemplo 1.1.2.** Consideremos os segmentos orientados esboçados na Figura 1.4. Observemos que os segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  têm a mesma direção. Já o segmento orientado  $EF$  tem direção diferente dos segmentos  $AB$  e  $CD$ .



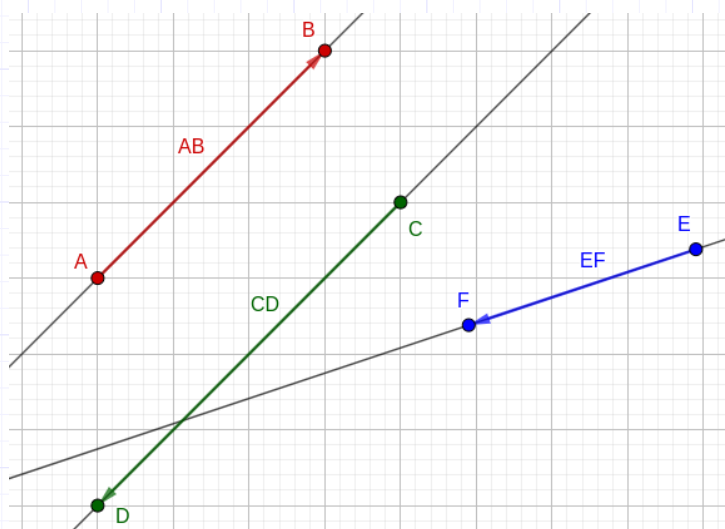


Figura 1.4: Esboço referente ao Exemplo 1.1.2.

### Comparação do sentido

► Vídeo disponível!

Segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  de mesma direção podem ter o mesmo sentido ou sentidos opostos. No caso de suas retas suportes não serem coincidentes, os segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  têm a mesma direção, quando os segmentos  $AC$  e  $BD$  não se interceptam. E, caso estas se interceptem, os segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  têm sentidos opostos.

**Exemplo 1.1.3.** Na Figura 1.5, temos que os segmentos  $AB$  e  $CD$  têm o mesmo sentido. De fato, observamos que eles têm a mesma direção e que os segmentos  $AC$  e  $BD$  têm interseção vazia.

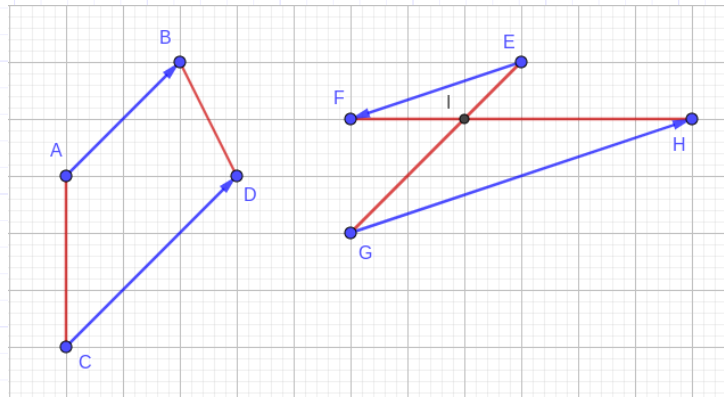


Figura 1.5: Segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  de mesmo sentido. Segmentos orientados  $EF$  e  $GH$  de sentidos opostos.

Na mesma Figura 1.5, vemos que os segmentos orientados  $EF$  e  $GH$  têm sentidos opostos, pois têm a mesma direção e os segmentos  $EG$  e  $FH$  se interceptam (no ponto  $I$ ).

**Observação 1.1.1.** A propriedade de segmentos orientados terem o mesmo sentido é transitiva. Ou seja, se  $AB$  e  $CD$  têm o mesmo sentido e  $CD$  e  $EF$  têm o mesmo sentido, então  $AB$  e  $EF$  têm o mesmo sentido.

Com base na Observação 1.1.1, analisamos o sentido de dois segmentos orientados e colineares escolhendo um deles e construindo um segmento orientado de mesmo sentido e não colinear. Então, analisamos o sentido dos segmentos orientados originais com respeito ao introduzido.

## Equipolência

► Vídeo disponível!

Um segmento orientado não nulo  $AB$  é **equipolente** a um segmento orientado  $CD$ , quando  $AB$  tem a **mesma norma**, a **mesma direção** e o **mesmo sentido** de  $CD$ . Segmentos nulos também são considerados equipolentes entre si. Quando  $AB$  é equipolente a  $CD$ , escrevemos  $AB \sim CD$ .

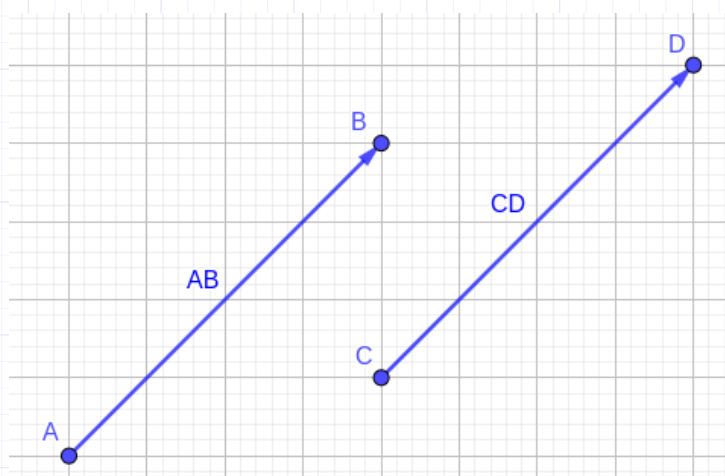


Figura 1.6: Esboço de dois segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  equipolentes.

A relação de equipolência é uma **relação de equivalência**. De fato, temos:

- **relação reflexiva:**  $AB \sim AB$ ;
- **relação simétrica:**  $AB \sim CD \Rightarrow CD \sim AB$ ;
- **relação transitiva:**  $AB \sim CD$  e  $CD \sim EF \Rightarrow AB \sim EF$ .

Com isso, dado um segmento  $AB$ , definimos a **classe de equipolência** de  $AB$  como o conjunto de todos os segmentos equipolentes a  $AB$ . O segmento  $AB$  é um **representante** desta classe.

## Exercícios resolvidos

**ER 1.1.1.** Mostre que dois segmentos orientados  $AB$  e  $CD$  são equipolentes se, e somente se, os pontos médios de  $AD$  e  $BC$  são coincidentes.

**Solução.** Começamos mostrando a implicação. Por hipótese, temos que  $AB$  e  $CD$  são equipolentes. A tese é clara no caso de  $AB$  e  $CD$  serem coincidentes. Vejamos, então, o caso em que  $AB$  e  $CD$  não são coincidentes. Desta forma,  $ABCD$  determina um paralelogramo de diagonais  $AD$  e  $BC$ . Como as diagonais de um paralelogramo se interceptam em seus pontos médios, temos demonstrado a implicação.

Agora, mostramos a recíproca. Por hipótese, temos que os pontos médios de  $AD$  e  $BC$  são coincidentes. Novamente, se  $AD$  e  $BD$  são coincidentes a conclusão é direta. Consideremos o caso em que  $AD$  e  $BD$  não são coincidentes. Daí, segue que  $AB$  e  $CD$  têm o mesmo tamanho e mesma direção. Seja  $M$  o ponto médio de  $AD$  e  $BC$  e  $\pi$  o plano determinado pelos segmentos  $AB$  e  $CD$ . Notando que  $M$ ,  $B$  e  $D$  estão no mesmo semiplano de  $\pi$  determinado pela reta  $AC$ , concluímos que  $AB$  e  $CD$  são equipolentes.

◇

**ER 1.1.2.** Mostre que  $AB \sim CD$ , então  $BA \sim DC$ .

**Solução.**  $AB$  e  $BA$  têm o mesmo tamanho e direção.  $CD$  e  $DC$  têm o mesmo tamanho e direção. Como  $AB \sim CD$ , temos que  $BA$  e  $DC$  têm o mesmo tamanho e direção. Por fim, observa-se que  $BA$  e  $DC$  têm ambos o mesmo sentido oposto de  $AB$  e  $DC$ .

◇

## Exercícios

**E.1.1.1.** Faça o esboço de dois segmentos  $AB$  e  $CD$  com  $|AB| \neq |CD|$  e cujas retas determinadas por eles sejam coincidentes.

**E.1.1.2.** Faça o esboço de dois segmentos orientados  $AB \not\sim CD$  e de mesmo sentido.

**E.1.1.3.** Faça o esboço de dois segmentos orientados colineares, de tamanhos iguais e sentidos opostos.

**E.1.1.4.** Diga se é verdadeira ou falsa a seguinte afirmação: é quadrado todo trapézio retângulo  $ABCD$  com segmentos orientados  $AD$  e  $BC$  equipolentes. Justifique sua afirmação.

**E.1.1.5.** Mostre que  $AB \sim CD$ , então  $AC \sim BD$ .

**E.1.1.6.** Mostre que se  $AC \sim CB$ , então  $C$  é ponto médio do segmento  $AB$ .

## 1.2 Vetor

► Vídeo disponível!

Dado um segmento orientado  $AB$ , define-se o vetor  $\overrightarrow{AB}$  (lê-se vetor  $AB$ ), a classe de equipolência de  $AB$ . Um segmento orientado da classe é um representante (geométrica) do vetor. A Figura 1.7 mostra duas representações de um dado vetor  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ .

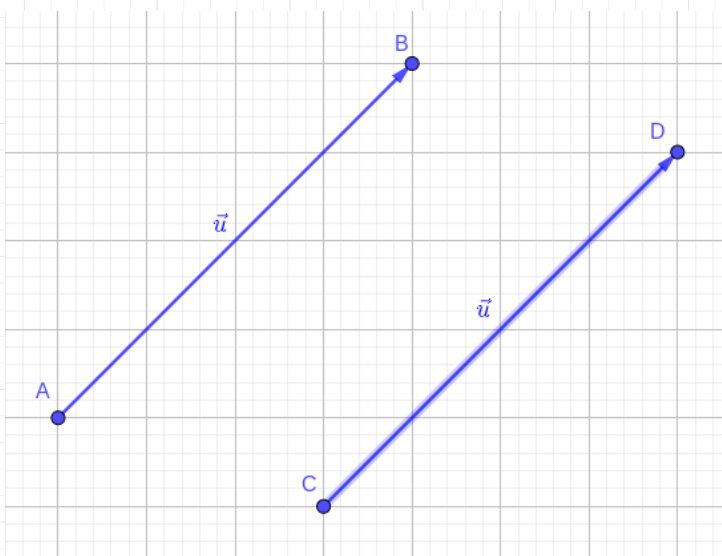


Figura 1.7: Esboço de duas representações de dado vetor  $\vec{u}$ .

O **vetor nulo** é aquele que tem como representante um segmento orientado nulo. É denotado por  $\vec{0}$  e geometricamente representado por um ponto.

A **norma** (ou módulo) de um vetor  $\vec{u}$  é denotada(o) por  $|\vec{u}|$  e é definido como a norma de qualquer uma de suas representações. Mais precisamente, se o segmento orientado  $AB$  é uma representação de  $\vec{v}$ , i.e.  $\vec{v} = \overrightarrow{AB}$ , então

$$|\vec{v}| = |\overrightarrow{AB}| := |AB| \quad (1.1)$$

**Observação 1.2.1.**  $|\vec{v}| = 0$  se, e somente se,  $\vec{v} = \vec{0}$ .

Seja  $\vec{v} = \overrightarrow{AB}$ . Lembrando que  $|\overrightarrow{AB}| = |AB|$ , i.e. a distância entre os pontos  $A$  e  $B$ , segue que se  $\vec{v} = \vec{0}$ , então  $AB$  é um segmento orientado nulo e, portanto,  $0 = |AB| = |\vec{v}|$ . Reciprocamente, se  $|\vec{v}| = 0$ , então  $|AB| =$

0 e, portanto,  $AB$  é um segmento orientado nulo, i.e.  $A$  e  $B$  são pontos sobrepostos (coincidentes) e  $\overrightarrow{AB} = \vec{0}$ .

Dois **vetores** são ditos **paralelos** quando qualquer de suas representações têm a mesma direção. De forma análoga, definem-se **vetores coplanares**, **vetores não coplanares**, **vetores ortogonais**, além de conceitos como **ângulo entre dois vetores**, etc.

**Exemplo 1.2.1.** Vejamos a Figura 1.8. Temos os vetores paralelos  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , enquanto que os vetores  $\vec{s}$  e  $\vec{t}$  são ortogonais (ou perpendiculares).

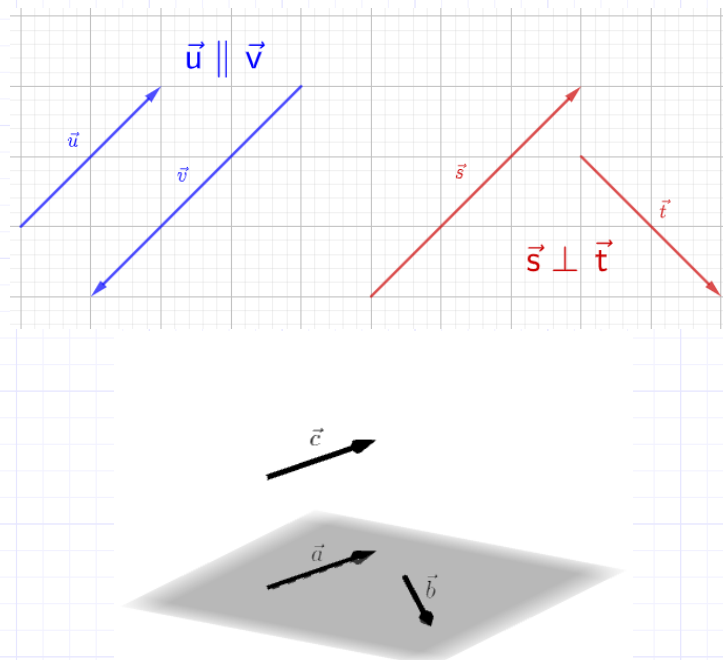


Figura 1.8: Esquerda: esboços de vetores paralelos e de vetores ortogonais. Direita: esboços de vetores coplanares.

Também da Figura 1.8, temos que os vetores  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são coplanares. Embora, na figura  $\vec{c}$  está representado fora do plano determinado pelas representações de  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , podemos tomar uma outra representação de  $\vec{c}$  coplanar a estas representações.

## 1.2.1 Adição de vetores

► Vídeo disponível!

Sejam dados dois vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Sejam, ainda, uma representação  $\overrightarrow{AB}$  de  $\vec{u}$  e uma representação  $\overrightarrow{BC}$  do vetor  $\vec{v}$ . Então, define-se o vetor soma  $\vec{u} + \vec{v}$  como o vetor representado por  $\overrightarrow{AC}$ . Veja a Figura 1.9.

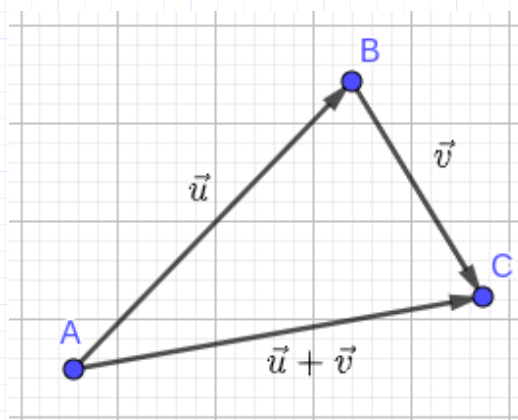


Figura 1.9: Representação geométrica da adição de dois vetores.

**Observação 1.2.2.** Vejamos as seguintes propriedades:

a) Elemento neutro na adição:

$$\vec{u} + \vec{0} = \vec{u} \quad (1.2)$$

De fato, seja  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ . Observamos que podemos representar  $\vec{0} = \overrightarrow{BB}$ . Logo, temos  $\vec{u} + \vec{0} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BB} = \overrightarrow{AB} = \vec{u}$ .

b) Associatividade na adição:

$$(\vec{u} + \vec{v}) + \vec{w} = \vec{u} + (\vec{v} + \vec{w}). \quad (1.3)$$

De fato, sejam  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ ,  $\vec{v} = \overrightarrow{BC}$  e  $\vec{w} = \overrightarrow{CD}$ . Então, segue

$$(\vec{u} + \vec{v}) + \vec{w} = (\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC}) + \overrightarrow{CD} \quad (1.4)$$

$$= \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CD} \quad (1.5)$$

$$= \overrightarrow{AD}, \quad (1.6)$$

bem como,

$$\vec{u} + (\vec{v} + \vec{w}) = \overrightarrow{AB} + (\overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CD}) \quad (1.7)$$

$$= \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BD} \quad (1.8)$$

$$= \overrightarrow{AD}. \quad (1.9)$$

c) Comutatividade da adição:

$$\vec{u} + \vec{v} = \vec{v} + \vec{u}. \quad (1.10)$$

Esta propriedade pode ser demonstrada usando a regra do paralelogramo que veremos mais adiante. Veja, também, o Exercício Resolvido 1.2.2.

## 1.2.2 Vetor oposto

► Vídeo disponível!

Um **vetor**  $\vec{v}$  é dito ser **oposto** a um dado vetor  $\vec{u}$ , quando quaisquer representações de  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são segmentos orientados de mesmo comprimento e mesma direção, mas com sentidos opostos. Neste caso, denota-se por  $-\vec{u}$  o vetor oposto a  $\vec{u}$ . Veja a Figura 1.10.

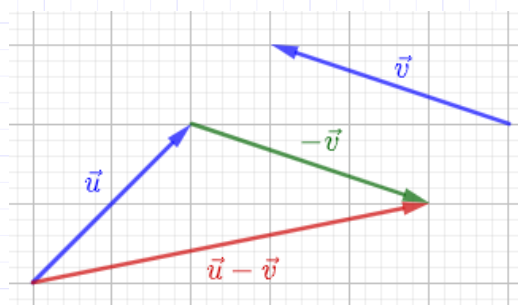


Figura 1.10: Representação geométrica de vetores opostos.

**Observação 1.2.3.**  $|\vec{v}| = |-\vec{v}|$ .

De fato, seja  $\vec{v} = \overrightarrow{AB}$ . Então,  $|\vec{v}| = |AB| = |BA| = |-\vec{v}|$ .



**Observação 1.2.4.** (Existência do oposto)

$$\vec{u} + (-\vec{u}) = \vec{0}. \quad (1.11)$$

De fato, seja  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ . Então,  $-\vec{u} = -\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{BA}$ . Segue que

$$\vec{u} + (-\vec{u}) = \overrightarrow{AB} + (-\overrightarrow{AB}) \quad (1.12)$$

$$= \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BA} \quad (1.13)$$

$$= \overrightarrow{AA} \quad (1.14)$$

$$= \vec{0}. \quad (1.15)$$

### 1.2.3 Subtração de vetores

► Vídeo disponível!

Sejam dados dois vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . A subtração de  $\vec{u}$  com  $\vec{v}$  é denotada por  $\vec{u} - \vec{v}$  e é definida pela adição de  $\vec{u}$  com  $-\vec{v}$ , i.e.  $\vec{u} - \vec{v} = \vec{u} + (-\vec{v})$ . Veja a Figura 1.11.

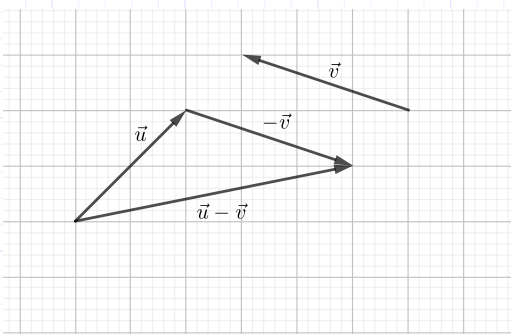


Figura 1.11: Representação geométrica da subtração de  $\vec{u}$  com  $\vec{v}$ , i.e.  $\vec{u} - \vec{v}$ .

**Observação 1.2.5.** (Regra do paralelogramo)

► Vídeo disponível!

Sejam vetores não nulos  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AD}$ . Seja, ainda,  $C$  o vértice oposto ao  $A$  no paralelogramo determinado pelos lados formados pelos segmentos  $AB$  e  $AD$ . Então, temos  $\vec{u} + \vec{v} = \overrightarrow{AC}$  e  $\vec{u} - \vec{v} = \overrightarrow{DB}$ . Veja a Figura 1.12.

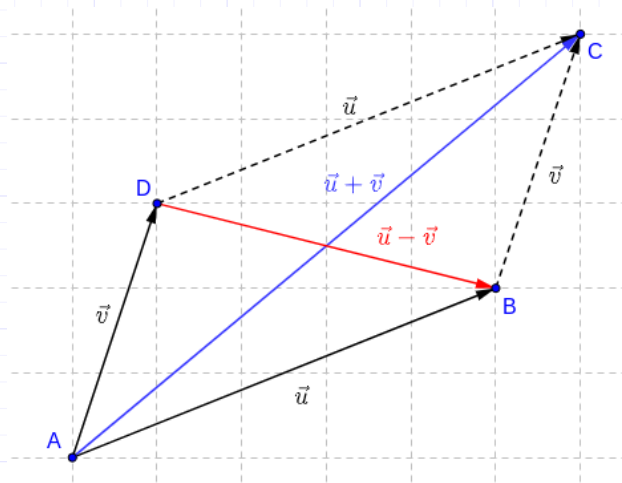


Figura 1.12: Regra do paralelogramo para a apresentação geométrica da soma e da diferença de vetores.

### 1.2.4 Multiplicação de vetor por um escalar

► Vídeo disponível!

A multiplicação de um número real  $\alpha > 0$  (escalar) por um vetor  $\vec{u}$  é denotado por  $\alpha\vec{u}$  e é definido pelo vetor de mesma direção e mesmo sentido de  $\vec{u}$  com norma  $\alpha|\vec{u}|$ . Quando  $\alpha = 0$ , define-se  $\alpha\vec{u} = \vec{0}$ , i.e. o vetor nulo (geometricamente, representado por qualquer ponto).

**Observação 1.2.6.** Notamos que:

- Para  $\alpha < 0$ , temos  $\alpha\vec{u} = -(-\alpha\vec{u})$ .
- $|\alpha\vec{u}| = |\alpha||\vec{u}|$ .

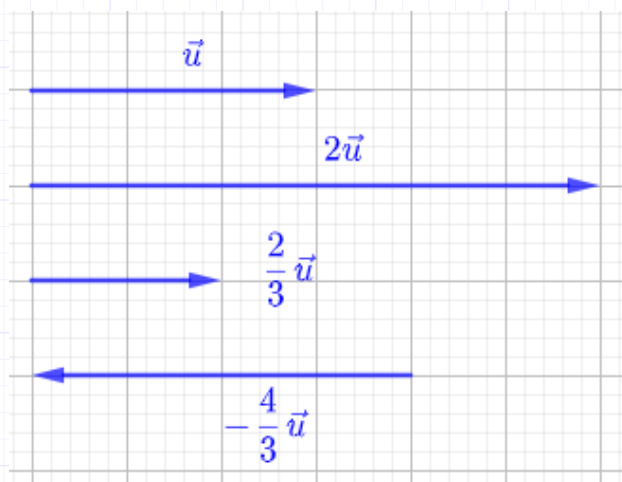


Figura 1.13: Representações geométricas de multiplicações de um vetor por diferentes escalares.

**Observação 1.2.7.** As seguintes propriedades são válidas:

a) Associatividade da multiplicação por escalar:

$$\alpha(\beta\vec{u}) = (\alpha\beta)\vec{u} \quad (1.16)$$

De fato, em primeiro lugar, observamos que  $\alpha(\beta\vec{u})$  e  $(\alpha\beta)\vec{u}$  têm a mesma direção e o mesmo sentido. Por fim, temos

$$|\alpha(\beta\vec{u})| = |\alpha||\beta\vec{u}| \quad (1.17)$$

$$= |\alpha|(|\beta||\vec{u}|) \quad (1.18)$$

$$= (|\alpha||\beta|)|\vec{u}| \quad (1.19)$$

$$= |\alpha\beta||\vec{u}| \quad (1.20)$$

$$= |(\alpha\beta)\vec{u}|. \quad (1.21)$$

b) Distributividade:

$$(\alpha + \beta)\vec{u} = \alpha\vec{u} + \beta\vec{u} \quad (1.22)$$

$$\alpha(\vec{u} + \vec{v}) = \alpha\vec{u} + \alpha\vec{v} \quad (1.23)$$

### 1.2.5 Resumo das propriedades das operações com vetores

As operações de adição e multiplicação por escalar de vetores têm propriedades importantes. Para quaisquer vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  e quaisquer escalares  $\alpha$  e  $\beta$  temos:

- comutatividade da adição:  $\vec{u} + \vec{v} = \vec{v} + \vec{u}$ ;
- associatividade da adição:  $(\vec{u} + \vec{v}) + \vec{w} = \vec{u} + (\vec{v} + \vec{w})$ ;
- elemento neutro da adição:  $\vec{u} + \vec{0} = \vec{u}$ ;
- existência do oposto:  $\vec{u} + (-\vec{u}) = \vec{0}$ ;
- associatividade da multiplicação por escalar:  $\alpha(\beta\vec{u}) = (\alpha\beta)\vec{u}$ ;
- distributividade da multiplicação por escalar:

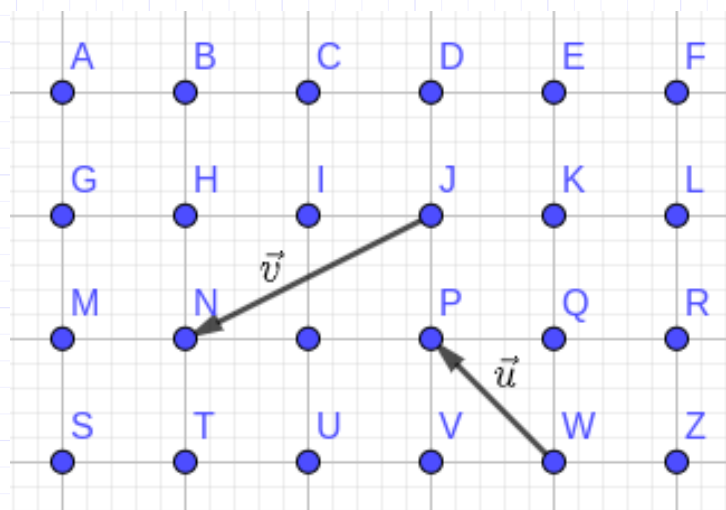
$$\alpha(\vec{u} + \vec{v}) = \alpha\vec{u} + \alpha\vec{v}, \quad (1.24)$$

$$(\alpha + \beta)\vec{u} = \alpha\vec{u} + \beta\vec{u}; \quad (1.25)$$

- existência do elemento neutro da multiplicação por escalar:  $1\vec{u} = \vec{u}$ .

### Exercícios resolvidos

**ER 1.2.1.** Com base na figura abaixo, forneça o vetor  $\overrightarrow{HC}$  como resultado de operações básicas envolvendo os vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ .



**Solução.** Vamos construir dois vetores auxiliares  $\overrightarrow{HB}$  e  $\overrightarrow{HI}$  a partir de operações envolvendo os vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Notamos que  $\overrightarrow{HC} = \overrightarrow{HI} + \overrightarrow{HB}$ .

Começamos buscando formar o vetor  $\overrightarrow{HI}$ . Para tanto, observamos que  $\vec{u} = \overrightarrow{NG}$  e, portanto,  $\vec{v} + \vec{u} = \overrightarrow{JG}$ . Com isso, obtemos que

$$\overrightarrow{HI} = -\frac{1}{3}\overrightarrow{JG} \quad (1.26)$$

$$= -\frac{1}{3}(\vec{v} + \vec{u}). \quad (1.27)$$

Agora, vamos formar o vetor  $\overrightarrow{HB}$ . Isso pode ser feito da seguinte forma

$$\overrightarrow{HB} = \overrightarrow{WQ} \quad (1.28)$$

$$= \vec{u} + \overrightarrow{PQ} \quad (1.29)$$

$$= \vec{u} + \overrightarrow{HI} \quad (1.30)$$

$$= \vec{u} - \frac{1}{3}(\vec{v} + \vec{u}) \quad (1.31)$$

$$= \frac{2}{3}\vec{u} - \frac{1}{3}\vec{v}. \quad (1.32)$$

Por tudo isso, concluímos que

$$\overrightarrow{HC} = \overrightarrow{HI} + \overrightarrow{HB} \quad (1.33)$$

$$= -\frac{1}{3}(\vec{v} + \vec{u}) \quad (1.34)$$

$$+ \frac{2}{3}\vec{u} - \frac{1}{3}\vec{v} \quad (1.35)$$

$$= \frac{1}{3}\vec{u} - \frac{2}{3}\vec{v}. \quad (1.36)$$

◇

**ER 1.2.2.** Mostre que  $\vec{u} + \vec{v} = \vec{v} + \vec{u}$ .

**Solução.** Seja  $ABCD$  o paralelogramo com  $\vec{u} = \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AD} = \overrightarrow{BC}$ . Logo, pela regra do paralelogramo temos

$$\vec{u} + \vec{v} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} \quad (1.37)$$

$$= \overrightarrow{AC} \quad (1.38)$$

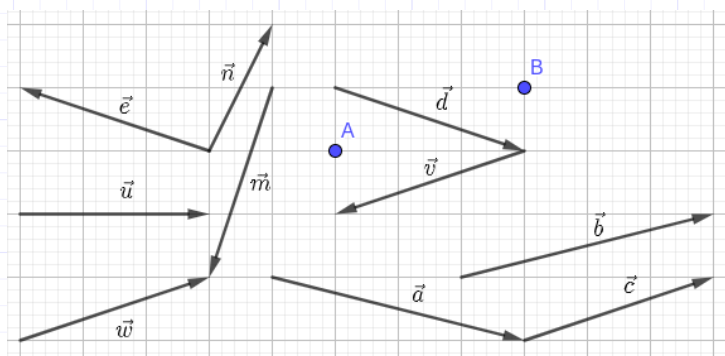
$$= \overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DC} \quad (1.39)$$

$$= \vec{v} + \vec{u}. \quad (1.40)$$



## Exercícios

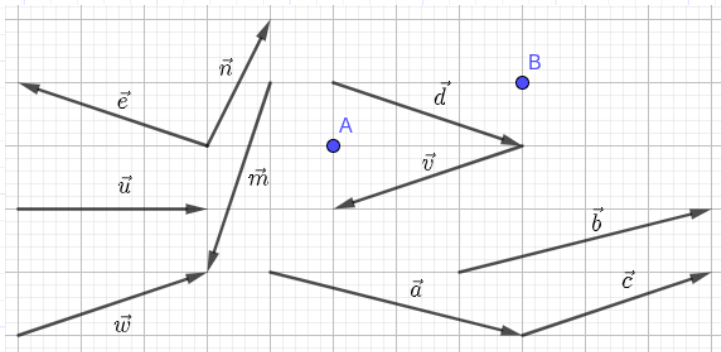
**E.1.2.1.** Com base na figura abaixo, qual(is) dos vetores indicados são iguais ao vetor  $\overrightarrow{AB}$ .



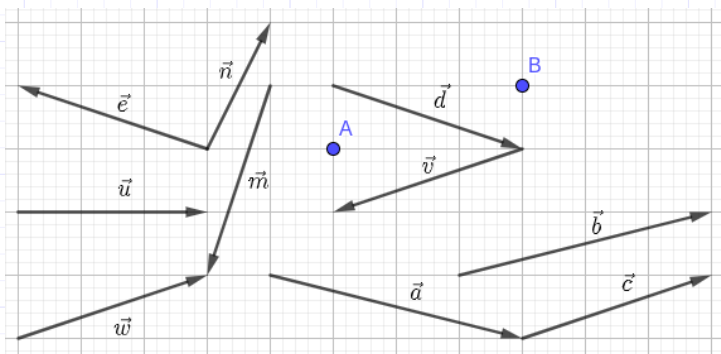
**E.1.2.2.** Sejam  $A$ ,  $B$  e  $C$  pontos dois a dois distintos. Se  $\vec{b}$  é um vetor nulo, então  $\vec{b}$  é igual a:

- a)  $\vec{0}$
- b)  $\overrightarrow{AB}$
- c)  $\overrightarrow{CC}$
- d)  $\overrightarrow{CA}$
- e)  $\overrightarrow{BB}$

**E.1.2.3.** Com base na figura abaixo, qual(is) dos vetores indicados são paralelos entre si.

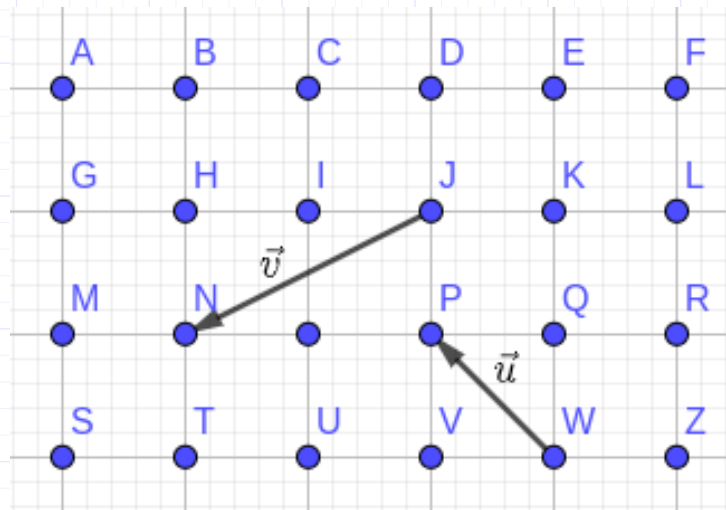


**E.1.2.4.** Com base na figura abaixo, qual(is) dos vetores indicados são ortogonais (perpendiculares) entre si.



**E.1.2.5.** Com base na figura abaixo, qual(is) dos seguintes são representações do vetor  $\vec{v} + \vec{u}$ ?

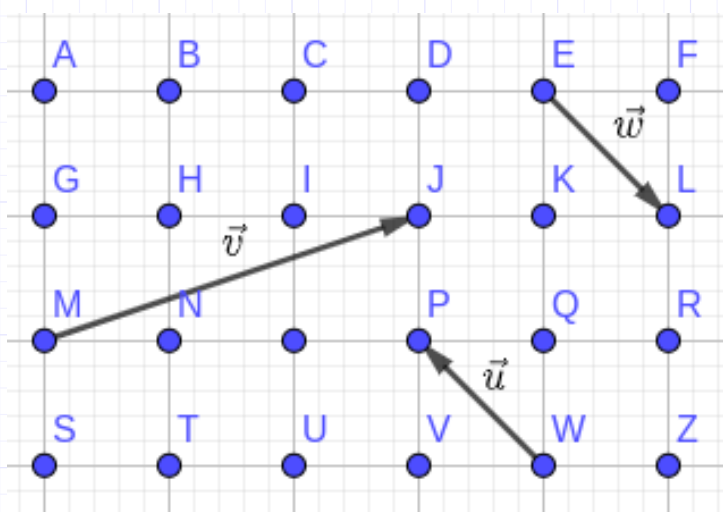
- a)  $\vec{JG}$
- b)  $\vec{QN}$
- c)  $\vec{AD}$
- d)  $\vec{JV}$
- e)  $\vec{NN}$



**E.1.2.6.** Com base na figura abaixo, qual(is) dos seguintes são representações do vetor  $\vec{w} + \vec{v} + \vec{u}$ ?

- a)  $\vec{0}$
- b)  $\overrightarrow{SP}$
- c)  $\overrightarrow{FP}$
- d)  $\vec{v}$
- e)  $\overrightarrow{AD}$





**E.1.2.7.** Com base na figura abaixo, escreva os seguintes vetores como resultado de operações envolvendo  $\vec{u}$  ou  $\vec{v}$ .

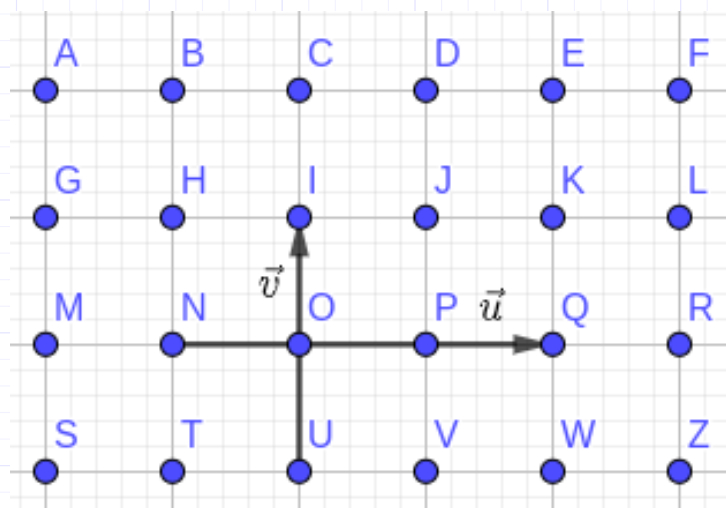
a)  $\overrightarrow{QK}$

b)  $\overrightarrow{KI}$

c)  $\overrightarrow{TO}$

d)  $\overrightarrow{PE}$

e)  $\overrightarrow{FT}$



**E.1.2.8.** Seja dado um vetor  $\vec{u} \neq 0$ . Calcule a norma do vetor  $\vec{v} = \vec{u}/|\vec{u}|$ <sup>1</sup>.

**E.1.2.9.** Diga se é verdadeira ou falsa cada uma das seguintes afirmações. Justifique sua resposta.

1.  $\vec{u} + \vec{u} = 2\vec{u}$
2.  $\vec{u} = -\vec{u} \Leftrightarrow \vec{u} = \vec{0}$ .

<sup>1</sup> $\vec{u}/|\vec{u}|$  é chamado de vetor  $\vec{u}$  normalizado, ou a normalização do vetor  $\vec{u}$ .

# Capítulo 2

## Bases e coordenadas

### 2.1 Combinação linear

► Vídeo disponível!

Dados vetores  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$  e números reais  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , com  $n$  inteiro positivo, chamamos de

$$\vec{u} = c_1\vec{u}_1 + c_2\vec{u}_2 + \dots + c_n\vec{u}_n \quad (2.1)$$

uma **combinação linear** de  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$ . Neste caso, também dizemos que  $\vec{u}$  é **gerado** pelos vetores  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$  ou, equivalentemente, que estes vetores **geram** o vetor  $\vec{u}$ .

**Exemplo 2.1.1.** Sejam dados os vetores  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$  e  $\vec{z}$ . Então, temos:

- a)  $\vec{u}_1 = \frac{1}{2}\vec{v} + \sqrt{2}\vec{z}$  é uma combinação linear dos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{z}$ .
- b)  $\vec{u}_2 = \vec{u} - 2\vec{z}$  é uma outra combinação linear dos vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{z}$ .
- c)  $\vec{u}_3 = 2\vec{u} - \vec{w} + \pi\vec{z}$  é uma combinação linear dos vetores  $\vec{u}, \vec{w}$  e  $\vec{z}$ .
- d)  $\vec{u}_4 = \frac{3}{2}\vec{z}$  é uma combinação linear do vetor  $\vec{z}$ .

**Observação 2.1.1.** (Interpretação geométrica)

- a) Uma combinação linear não nula envolvendo um único vetor  $\vec{u}$  é um vetor paralelo a  $\vec{u}$ . De fato, seja

$$\vec{v} = c\vec{u}, \quad c \neq 0, \quad (2.2)$$

i.e.  $\vec{v}$  é combinação linear não nula de  $\vec{u}$ . Então,  $\vec{v}$  tem a mesma direção de  $\vec{u}$ .

- b) Uma combinação linear não nula envolvendo dois vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  é coplanar a estes vetores. De fato, seja

$$\vec{w} = c_1\vec{u} + c_2\vec{v}, \quad c_1 \cdot c_2 \neq 0, \quad (2.3)$$

e  $\pi$  o plano determinado pelas representações de  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AC}$ . Logo, seguindo a regra do paralelogramo, vemos que  $\vec{w}$  tem uma representação no plano determinado pelos segmentos  $AB$  e  $AC$ .

### Exercícios resolvidos

**ER 2.1.1.** Com base na figura abaixo, escreva o vetor  $\vec{u}$  como combinação linear dos vetores  $\vec{i} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{j} = \overrightarrow{OB}$ .

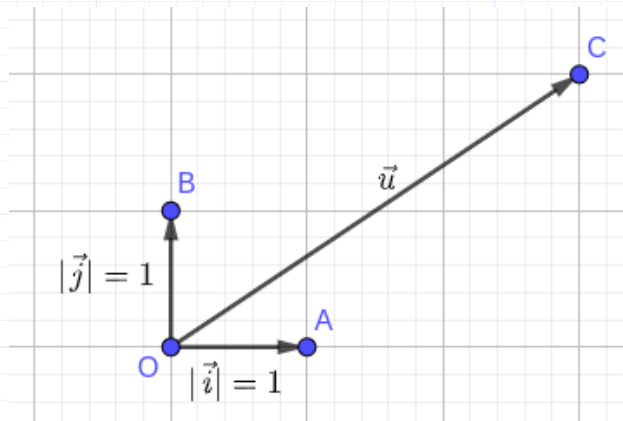


Figura 2.1: ER 2.1.1.

**Solução.** Para escrevermos o vetor  $\vec{u}$  como combinação linear dos vetores  $\vec{i}$  e  $\vec{j}$ , devemos determinar números  $c_1$  e  $c_2$  tais que

$$\vec{u} = c_1\vec{i} + c_2\vec{j}. \quad (2.4)$$

Com base na Figura 2.1, podemos tomar  $c_1 = 3$  e  $c_2 = 2$ , i.e. temos

$$\vec{u} = 3\vec{i} + 2\vec{j}. \quad (2.5)$$



**ER 2.1.2.** Sabendo que  $\vec{u} = 2\vec{v}$ , forneça três maneiras de escrever o vetor nulo  $\vec{0}$  como combinação linear dos vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ .

**Solução.**

a)

$$\vec{u} = 2\vec{v} \quad (2.6)$$

$$\vec{0} = 2\vec{v} - \vec{u} \quad (2.7)$$

b)

$$\vec{u} = 2\vec{v} \quad (2.8)$$

$$\vec{u} - 2\vec{v} = \vec{0} \quad (2.9)$$

$$\vec{0} = \vec{u} - 2\vec{v} \quad (2.10)$$

c)

$$\vec{u} = 2\vec{v} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{2}\vec{u} = \vec{v} \quad (2.12)$$

$$\vec{0} = \vec{v} - \frac{1}{2}\vec{u} \quad (2.13)$$



## Exercícios

**E.2.1.1.** Com base na figura abaixo, escreva  $\vec{u}$  como combinação linear dos vetores  $\vec{i} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{j} = \overrightarrow{OB}$ .

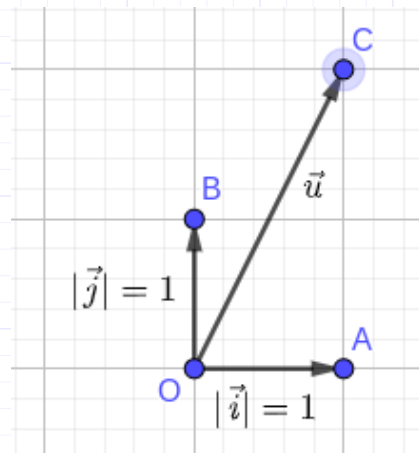


Figura 2.2: E 2.1.1.

**E.2.1.2.** Com base na figura abaixo, escreva  $\vec{u}$  = como combinação linear dos vetores  $\vec{i} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{j} = \overrightarrow{OB}$ .

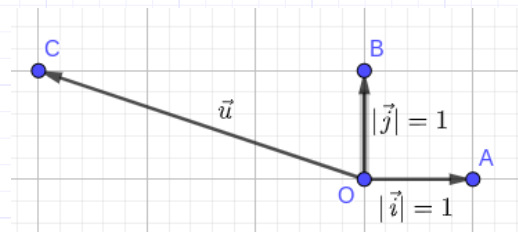


Figura 2.3: E 2.1.2.

**E.2.1.3.** Com base na figura abaixo, escreva  $\vec{u}$  = como combinação linear dos vetores  $\vec{i} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{j} = \overrightarrow{OB}$ .

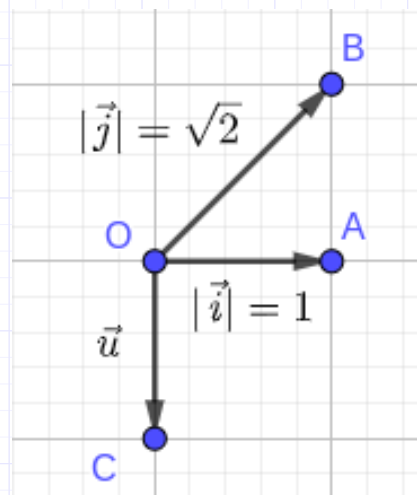


Figura 2.4: E 2.1.3.

**E.2.1.4.** Sabendo que  $\vec{u} = 3\vec{w} + \vec{v}$ , escreva  $\vec{w}$  como combinação linear de  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ .

**E.2.1.5.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  vetores de mesma direção e  $\vec{w}$  um vetor não paralelo a  $\vec{u}$ , todos não nulos. Pode-se escrever  $\vec{w}$  como combinação linear de  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ ? Justifique sua resposta.

**E.2.1.6.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  ambos não nulos e de mesma direção. Pode-se afirmar que  $\vec{u}$  gera  $\vec{v}$ ? Justifique sua resposta.

**E.2.1.7.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  coplanares com direções diferentes e  $\vec{w}$  um vetor não coplanar a  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , todos não nulos. É possível gerar  $\vec{w}$  com  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ ?

**E.2.1.8.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  não nulos, coplanares e com direções distintas. Se  $\vec{w}$  é um vetor também coplanar a  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , então  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  geram  $\vec{w}$ ? Justifique sua resposta.

## 2.2 Dependência linear

Dois ou mais vetores dados são **linearmente dependentes** (l.d.) quando um deles for combinação linear dos demais.

**Exemplo 2.2.1.** No exemplo anterior (Exemplo 2.1.1), temos:

Notas de Aula - Pedro Konzen \*/\* Licença CC-BY-SA 4.0

- a)  $\vec{u}_1$  é linearmente dependente (l.d.) dos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{z}$ .
- b)  $\vec{u}_2$  é l.d. a  $\vec{u}$  e  $\vec{z}$ .
- c)  $\vec{u}_3$  depende linearmente dos vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{z}$ .
- d) Os vetores  $\vec{u}_4$  e  $\vec{z}$  são linearmente dependentes.

Dois ou mais vetores dados são **linearmente independentes** (l.i.) quando eles não são linearmente dependentes.

### 2.2.1 Observações

#### Dois vetores

Dois vetores quaisquer  $\vec{u} \neq \vec{0}$  e  $\vec{v} \neq \vec{0}$  são l.d. se, e somente se, qualquer uma das seguinte condições é satisfeita:

- a) um deles é combinação linear do outro, i.e.

$$\vec{u} = \alpha \vec{v} \quad \text{ou} \quad \vec{v} = \beta \vec{u}; \quad (2.14)$$

- b)  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  têm a mesma direção;
- c)  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são paralelos.

De fato, a afirmação a) é a definição de dependência linear. A b) é consequência imediata da a), bem como a c) é equivalente a b). Por fim, se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são vetores paralelos, então um é múltiplo por escalar do outro. Ou seja, c) implica a).

**Observação 2.2.1.** O vetor nulo  $\vec{0}$  é l.d. a qualquer vetor  $\vec{u}$ . De fato, temos

$$\vec{0} = 0 \cdot \vec{u}, \quad (2.15)$$

i.e. o vetor nulo é combinação linear do vetor  $\vec{u}$ .

**Observação 2.2.2.** Dois vetores não nulos  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.i. se, e somente se,

$$\alpha \vec{u} + \beta \vec{v} = \vec{0} \Rightarrow \alpha = \beta = 0. \quad (2.16)$$



De fato, se  $\alpha \neq 0$ , então podemos escrever

$$\vec{u} = -\frac{\beta}{\alpha}\vec{v}, \quad (2.17)$$

i.e. o vetor  $\vec{u}$  é combinação linear do vetor  $\vec{v}$  e, portanto, estes vetores são l.d.. Isto contradiz a hipótese de eles serem l.i.. Analogamente, se  $\beta \neq 0$ , então podemos escrever

$$\vec{v} = -\frac{\alpha}{\beta}\vec{u} \quad (2.18)$$

e, então, teríamos  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  l.d..

### Três vetores

Três vetores quaisquer  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d. quando um deles pode ser escrito como combinação linear dos outros dois. Sem perda de generalidade, isto significa que existem constantes  $\alpha$  e  $\beta$  tais que

$$\vec{u} = \alpha\vec{v} + \beta\vec{w}. \quad (2.19)$$

**Afirmamos que se  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d., então  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são coplanares.**

Do fato de que dois vetores quaisquer são sempre coplanares, temos que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são coplanares caso qualquer um deles seja o vetor nulo. Suponhamos, agora, que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são não nulos e seja  $\pi$  o plano determinado pelos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$ . Se  $\alpha = 0$ , então  $\vec{u} = \beta\vec{w}$  e teríamos uma representação de  $\vec{u}$  no plano  $\pi$ . Analogamente, se  $\beta = 0$ , então  $\vec{u} = \alpha\vec{v}$  e teríamos uma representação de  $\vec{u}$  no plano  $\pi$ . Por fim, observamos que se  $\alpha, \beta \neq 0$ , então  $\alpha\vec{v}$  tem a mesma direção de  $\vec{v}$  e  $\beta\vec{w}$  tem a mesma direção de  $\vec{w}$ . Isto é,  $\alpha\vec{v}$  e  $\beta\vec{w}$  admitem representações no plano  $\pi$ . Sejam  $\overrightarrow{AB}$  e  $\overrightarrow{BC}$  representações dos vetores  $\alpha\vec{v}$  e  $\beta\vec{w}$ , respectivamente. Os pontos  $A$ ,  $B$  e  $C$  pertencem a  $\pi$ , assim como o segmento  $AC$ . Como  $\overrightarrow{AC} = \vec{u} = \alpha\vec{v} + \beta\vec{w}$ , concluímos que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são coplanares.

Reciprocamente, **se  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são coplanares, então  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d..** De fato, se um deles for nulo, por exemplo,  $\vec{u} = \vec{0}$ , então  $\vec{u}$  pode ser escrito como a seguinte combinação linear dos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$

$$\vec{u} = 0\vec{v} + 0\vec{w}. \quad (2.20)$$

Neste caso,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d.. Também, se dois dos vetores forem paralelos, por exemplo,  $\vec{u} \parallel \vec{v}$ , então temos a combinação linear

$$\vec{u} = \alpha\vec{v} + 0\vec{w}. \quad (2.21)$$

E, então,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d.. Agora, suponhamos que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são não nulos e dois a dois concorrentes (i.e. todos com direções distintas). Sejam, então  $\overrightarrow{PA} = \vec{u}$ ,  $\overrightarrow{PB} = \vec{v}$  e  $\overrightarrow{PC} = \vec{w}$  representações sobre um plano  $\pi$ . Sejam  $r$  e  $s$  as retas determinadas por  $PA$  e  $PC$ , respectivamente. Seja, então,  $D$  o ponto de interseção da reta  $s$  com a reta paralela a  $r$  que passa pelo ponto  $B$ . Seja, também,  $E$  o ponto de interseção da reta  $r$  com a reta paralela a  $s$  que passa pelo ponto  $B$ . Sejam, então,  $\alpha$  e  $\beta$  tais que  $\alpha\vec{u} = \overrightarrow{PE}$  e  $\beta\vec{w} = \overrightarrow{PD}$ . Como  $\vec{v} = \overrightarrow{PB} = \overrightarrow{PE} + \overrightarrow{PD} = \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}$ , temos que  $\vec{v}$  é combinação linear de  $\vec{u}$  e  $\vec{w}$ , i.e.  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d..

**Observação 2.2.3.** Três vetores dados  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.i. se, e somente se,

$$\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} + \gamma\vec{w} = 0 \Rightarrow \alpha = \beta = \gamma = 0. \quad (2.22)$$

De fato, sem perda de generalidade, se  $\alpha \neq 0$ , podemos escrever

$$\vec{u} = -\frac{\beta}{\alpha}\vec{v} - \frac{\gamma}{\alpha}\vec{w}, \quad (2.23)$$

e teríamos  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  vetores l.d..

### Quatro ou mais vetores

**Quatro ou mais vetores são sempre l.d..** De fato, sejam dados quatro vetores  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  e  $\vec{d}$ . Se dois ou três destes forem l.d.entre si, então, por definição, os quatro são l.d.. Assim sendo, suponhamos que três dos vetores sejam l.i. e provaremos que, então, o outro vetor é combinação linear desses três.

Sem perda de generalidade, suponhamos que  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são l.i.. Logo, eles não são coplanares. Seja, ainda,  $\pi$  o plano determinado pelos vetores  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e as representações  $\vec{a} = \overrightarrow{PA}$ ,  $\vec{b} = \overrightarrow{PB}$ ,  $\vec{c} = \overrightarrow{PC}$  e  $\vec{d} = \overrightarrow{PD}$ .

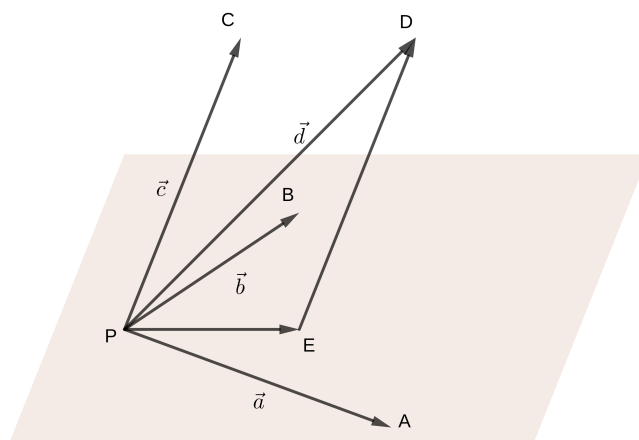


Figura 2.5: Quatro vetores são l.d..

Consideremos a reta  $r$  paralela a  $\overrightarrow{PC}$  que passa pelo ponto  $D$ . Então, seja  $E$  o ponto de interseção de  $r$  com o plano  $\pi$ . Vejamos a Figura 2.5. Observamos que o vetor  $\overrightarrow{PE}$  é coplanar aos vetores  $\overrightarrow{PA}$  e  $\overrightarrow{PB}$  e, portanto, existem números reais  $\alpha$  e  $\beta$  tal que

$$\overrightarrow{PE} = \alpha \overrightarrow{PA} + \beta \overrightarrow{PB}. \quad (2.24)$$

Além disso, como  $\overrightarrow{ED}$  tem a mesma direção e sentido de  $\overrightarrow{PC} = \vec{c}$ , temos que

$$\overrightarrow{ED} = \gamma \overrightarrow{PC} \quad (2.25)$$

para algum número real  $\gamma$ . Por fim, observamos que

$$\begin{aligned} \overrightarrow{PD} &= \overrightarrow{PE} + \overrightarrow{ED} \\ &= \alpha \overrightarrow{PA} + \beta \overrightarrow{PB} + \gamma \overrightarrow{PC} \\ &= \alpha \vec{a} + \beta \vec{b} + \gamma \vec{c}. \end{aligned}$$

## Exercícios resolvidos

**ER 2.2.1.** Se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.i. e

$$\vec{a} = 2\vec{u} - 3\vec{v}, \quad (2.26)$$

$$\vec{b} = \vec{u} + 2\vec{v}, \quad (2.27)$$

então  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  são l.d.?

**Solução.** Os vetores  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  são l.i. se, e somente se,

$$\alpha\vec{a} + \beta\vec{b} = \vec{0} \Rightarrow \alpha = \beta = 0. \quad (2.28)$$

Observemos que

$$\vec{0} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} \quad (2.29)$$

$$= \alpha(2\vec{u} - 3\vec{v}) + \beta(\vec{u} + 2\vec{v}) \quad (2.30)$$

$$= (2\alpha + \beta)\vec{u} + (-3\alpha + 2\beta)\vec{v} \quad (2.31)$$

implica

$$2\alpha + \beta = 0 \quad (2.32)$$

$$-3\alpha + 2\beta = 0 \quad (2.33)$$

Resolvendo este sistema, vemos que  $\alpha = \beta = 0$ . Logo, concluímos que  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  são l.i..

◇

**ER 2.2.2.** Sejam  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  três vetores. Verifique a seguinte afirmação de que se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.d., então  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d.. Justifique sua resposta.

**Solução.** A afirmação é verdadeira. De fato, se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.d., então existe um escalar  $\alpha$  tal que

$$\vec{u} = \alpha\vec{v}. \quad (2.34)$$

Segue que

$$\vec{u} = \alpha\vec{v} + 0\vec{w}. \quad (2.35)$$

Isto é,  $\vec{u}$  é combinação linear de  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$ . Então, por definição,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d..

◇

**ER 2.2.3.** Sejam  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AC}$ . Mostre que  $A$ ,  $B$  e  $C$  são colineares se, e somente se,  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.d..

**Solução.** Primeiramente, vamos verificar a implicação. Se  $A$ ,  $B$  e  $C$  são colineares, então os segmentos  $AB$  e  $AC$  têm a mesma direção. Logo, são l.d. os vetores  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AC}$ .

Agora, verificamos a recíproca. Se  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{AC}$  são l.d., então os segmentos  $AB$  e  $AC$  têm a mesma direção. Como eles são concorrentes, segue que  $A$ ,  $B$  e  $C$  são colineares.

◇

## Exercícios

**E.2.2.1.** Sendo  $\overrightarrow{AB} + 2\overrightarrow{BC} = \vec{0}$ , mostre que  $\overrightarrow{PA}$ ,  $\overrightarrow{PB}$  e  $\overrightarrow{PC}$  são l.d. para qualquer ponto  $P$ .

**E.2.2.2.** Sejam dados três vetores quaisquer  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$ . Mostre que os vetores  $\vec{u} = 2\vec{a} - \vec{b}$ ,  $\vec{v} = -\vec{a} - 2\vec{c}$  e  $\vec{w} = \vec{b} + 4\vec{c}$  são l.d..

**E.2.2.3.** Sejam  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ ,  $\vec{v} = \overrightarrow{AC}$  e  $\vec{w} = \overrightarrow{AD}$ . Mostre que  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são coplanares se, e somente se,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.d..

**E.2.2.4.** Se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.i. e

$$\vec{a} = 2\vec{u} - \vec{v}, \quad (2.36)$$

$$\vec{b} = 2\vec{v} - 4\vec{u}, \quad (2.37)$$

então  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  são l.i.? Justifique sua resposta.

**E.2.2.5.** Verifique se é verdadeira ou falsa cada uma das seguintes afirmações. Justifique sua resposta.

a)  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$  l.d.  $\Rightarrow \vec{u}, \vec{v}$  l.d..

b)  $\vec{u}, \vec{0}, \vec{w}$  são l.d..

c)  $\vec{u}, \vec{v}$  l.i.  $\Rightarrow \vec{u}, \vec{v}$  e  $\vec{w}$  l.i..

d)  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$  l.d.  $\Rightarrow -\vec{u}, 2\vec{v}, -3\vec{w}$  l.d..

## 2.3 Bases e coordenadas

► Vídeo disponível!

Seja  $V$  o conjunto de todos os vetores no espaço tridimensional. Conforme discutido na Seção 2.2, se  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são l.i., então qualquer vetor  $\vec{u} \in V$  pode ser escrito como uma combinação linear destes vetores, i.e. existem números reais  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  tal que

$$\vec{u} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}. \quad (2.38)$$

A observação acima motiva a seguinte definição: uma **base** de  $V$  é uma sequência de três vetores l.i. de  $V$ .

Seja  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  uma dada base de  $V$ . Então, dado qualquer  $\vec{v} \in V$ , existe um único terno de números reais  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  tais que

$$\vec{v} = \alpha\vec{a} + \beta\vec{b} + \gamma\vec{c}. \quad (2.39)$$

De fato, a existência de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  segue imediatamente do fato de que  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são l.i. e, portanto,  $\vec{v}$  pode ser escrito como uma combinação linear destes vetores. Agora, para verificar a unicidade de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , tomamos  $\alpha'$ ,  $\beta'$  e  $\gamma'$  tais que

$$\vec{v} = \alpha'\vec{a} + \beta'\vec{b} + \gamma'\vec{c}. \quad (2.40)$$

Subtraindo (2.40) de (2.39), obtemos

$$\vec{0} = (\alpha - \alpha')\vec{a} + (\beta - \beta')\vec{b} + (\gamma - \gamma')\vec{c}. \quad (2.41)$$

Como  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são l.i., segue que<sup>1</sup>

$$\alpha - \alpha' = 0, \quad \beta - \beta' = 0, \quad \gamma - \gamma' = 0, \quad (2.42)$$

i.e.  $\alpha = \alpha'$ ,  $\beta = \beta'$  e  $\gamma = \gamma'$ .

<sup>1</sup>Lembre-se da Observação 2.2.3.

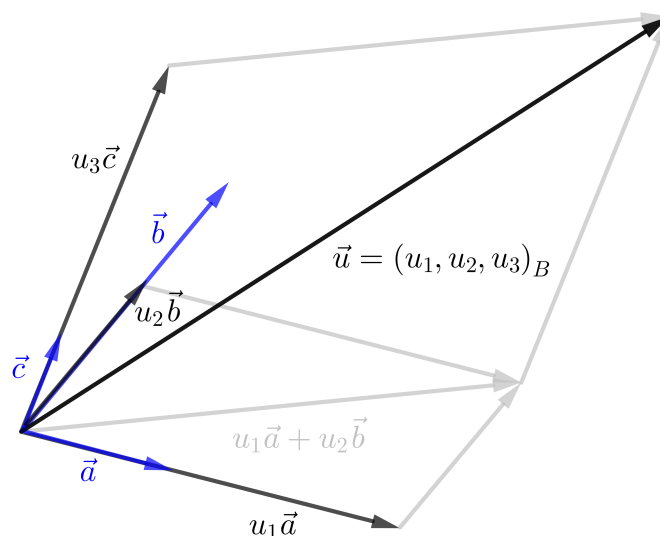


Figura 2.6: Representação de um vetor  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B$  em uma dada base  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ .

Com isso, fixada uma base  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ , cada vetor  $\vec{u}$  é representado de forma única como combinação linear dos vetores da base, digamos

$$\vec{u} = u_1\vec{a} + u_2\vec{b} + u_3\vec{c}, \quad (2.43)$$

onde  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  são números reais fixos, chamados de **coordenadas** do  $\vec{u}$  na base  $B$ . Ainda, usamos a notação

$$\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B, \quad (2.44)$$

para expressar o vetor  $\vec{u}$  nas suas coordenadas na base  $B$ . Vejamos a Figura 2.6.

**Exemplo 2.3.1.** Fixada uma base  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ , o vetor  $\vec{u}$  de coordenadas  $\vec{u} = (-2, \sqrt{2}, -3)_B$  é o vetor  $\vec{u} = -2\vec{a} + \sqrt{2}\vec{b} - 3\vec{c}$ .

### 2.3.1 Operações de vetores com coordenadas

Na Seção 1.2, definimos as operações de adição, subtração e multiplicação por escalar do ponto de vista geométrico. Aqui, veremos como estas operações são definidas a partir das coordenadas de vetores.

Sejam  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  uma base de  $V$  e os vetores  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B$  e  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)_B$ . Isto é, temos

$$\vec{u} = u_1\vec{a} + u_2\vec{b} + u_3\vec{c}, \quad (2.45)$$

$$\vec{v} = v_1\vec{a} + v_2\vec{b} + v_3\vec{c}. \quad (2.46)$$

Então, a **adição** de  $\vec{u}$  com  $\vec{v}$  é a soma

$$\vec{u} + \vec{v} = \underbrace{u_1\vec{a} + u_2\vec{b} + u_3\vec{c}}_{\vec{u}} + \underbrace{v_1\vec{a} + v_2\vec{b} + v_3\vec{c}}_{\vec{v}} \quad (2.47)$$

$$= (u_1 + v_1)\vec{a} + (u_2 + v_2)\vec{b} + (u_3 + v_3)\vec{c}, \quad (2.48)$$

ou seja

$$\vec{u} + \vec{v} = (u_1 + v_1, u_2 + v_2, u_3 + v_3)_B. \quad (2.49)$$

**Exemplo 2.3.2.** Fixada uma base qualquer  $B$  e dados os vetores  $\vec{u} = (2, -1, -3)_B$  e  $\vec{v} = (-1, 4, -5)_B$ , temos

$$\vec{u} + \vec{v} = (2 + (-1), -1 + 4, -3 + (-5))_B = (1, 3, -8)_B. \quad (2.50)$$

Podemos usar o **SymPy** para manipularmos vetores em coordenadas. Para computarmos a soma neste exemplo, podemos usar os seguintes comandos:

```
from sympy import *
u = Matrix([2,-1,-3])
v = Matrix([-1,4,-5])
u+v
```

De forma, análoga, o **vetor oposto** ao vetor  $\vec{u}$  é

$$-\vec{u} = -(\underbrace{u_1\vec{a} + u_2\vec{b} + u_3\vec{c}}_{\vec{u}}) \quad (2.51)$$

$$= (-u_1)\vec{a} + (-u_2)\vec{b} + (-u_3)\vec{c}, \quad (2.52)$$

ou seja,

$$-\vec{u} = (-u_1, -u_2, -u_3)_B. \quad (2.53)$$



**Exemplo 2.3.3.** Fixada uma base qualquer  $B$  e dado o vetor  $\vec{v} = (2, -1, -3)_B$ , temos

$$-\vec{v} = (-2, 1, 3)_B. \quad (2.54)$$

Usando o Sympy, podemos computar o oposto do vetor  $\vec{v}$  com os seguintes comandos:

```
from sympy import *
v = Matrix([2,-1,-3])
-v
```

Lembrando que **subtração** de  $\vec{u}$  com  $\vec{v}$  é  $\vec{u} - \vec{v} := \vec{u} + (-\vec{v})$ , segue

$$\vec{u} - \vec{v} = (u_1 - v_1, u_2 - v_2, u_3 - v_3)_B. \quad (2.55)$$

**Exemplo 2.3.4.** Fixada uma base qualquer  $B$  e dados os vetores  $\vec{u} = (2, -1, -3)_B$  e  $\vec{v} = (-1, 4, -5)_B$ , temos

$$\vec{u} - \vec{v} = (2 - (-1), -1 - 4, -3 - (-5))_B = (3, -5, 2)_B. \quad (2.56)$$

Usando o Sympy, podemos computar  $\vec{u} - \vec{v}$  com os seguintes comandos:

```
from sympy import *
u = Matrix([2,-1,-3])
v = Matrix([-1,4,-5])
u-v
```

Com o mesmo raciocínio, fazemos a **multiplicação de um dado número**  $\alpha$  pelo **vetor**  $\vec{u}$ . Vejamos, por definição,

$$\alpha \vec{u} = \alpha (\underbrace{u_1 \vec{a} + u_2 \vec{b} + u_3 \vec{c}}_{\vec{u}}) \quad (2.57)$$

$$= (\alpha u_1) \vec{a} + (\alpha u_2) \vec{b} + (\alpha u_3) \vec{c}, \quad (2.58)$$

ou seja,

$$\alpha \vec{u} = (\alpha u_1, \alpha u_2, \alpha u_3). \quad (2.59)$$

**Exemplo 2.3.5.** Fixada uma base qualquer  $B$  e dado o vetor  $\vec{v} = (2, -1, -3)_B$ , temos

$$-\frac{1}{3} \vec{v} = \left(-\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 1\right)_B. \quad (2.60)$$

Usando o Sympy, temos:

```

from sympy import *
v = Matrix([2,-1,-3])
-1/3*v

```

### 2.3.2 Dependência linear

#### Dois vetores

Na Subseção 2.2.1, discutimos que dois vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  são l.d. se, e somente se, um for múltiplo do outro, i.e. existe um número real  $\alpha$  tal que

$$\vec{u} = \alpha \vec{v}, \quad (2.61)$$

sem perda de generalidade<sup>2</sup>.

Fixada uma base  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ , temos  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B$  e  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)_B$ . Com isso, a equação (2.61) pode ser reescrita como

$$(u_1, u_2, u_3)_B = \alpha(v_1, v_2, v_3)_B = (\alpha v_1, \alpha v_2, \alpha v_3)_B, \quad (2.62)$$

donde

$$u_1 = \alpha v_1, \quad u_2 = \alpha v_2, \quad u_3 = \alpha v_3. \quad (2.63)$$

Ou seja, dois vetores são linearmente dependentes se, e somente se, as coordenadas de um deles forem, respectivamente, múltiplas (de mesmo fator) das coordenadas do outro.

**Exemplo 2.3.6.** Vejamos os seguintes casos:

a)  $\vec{u} = (2, -1, -3)$  e  $\vec{v} = (1, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2})$  são l.d., pois

$$2 = 2 \cdot 1, \quad -1 = 2 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right), \quad -3 = 2 \cdot \left(-\frac{3}{2}\right). \quad (2.64)$$

b)  $\vec{u} = (2, -1, -3)$  e  $\vec{v} = (2, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2})$  são l.i., pois  $u_1 = 1 \cdot v_1$ , enquanto  $u_2 = 2v_2$ .

---

<sup>2</sup>Formalmente, pode ocorrer  $\vec{v} = \beta \vec{u}$ .

### Três vetores

Na Subseção 2.2.1, discutimos que três vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.i. se, e somente se,

$$\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} + \gamma\vec{w} = \vec{0} \Rightarrow \alpha = \beta = \gamma = 0. \quad (2.65)$$

Seja, então,  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  uma base de  $V$ . Então, temos que a equação

$$\alpha\vec{u} + \beta\vec{v} + \gamma\vec{w} = \vec{0} \quad (2.66)$$

é equivalente a

$$\alpha(u_1, u_2, u_3)_B + \beta(v_1, v_2, v_3)_B + \gamma(w_1, w_2, w_3)_B = (0, 0, 0)_B. \quad (2.67)$$

Esta por sua vez, nos leva ao seguinte sistema linear

$$\begin{cases} u_1\alpha + v_1\beta + w_1\gamma = 0 \\ u_2\alpha + v_2\beta + w_2\gamma = 0 \\ u_3\alpha + v_3\beta + w_3\gamma = 0 \end{cases} \quad (2.68)$$

Lembremos que um tal sistema tem solução única (trivial) se, e somente se, o determinante de sua matriz dos coeficientes é não nulo, i.e.

$$\begin{vmatrix} u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 \end{vmatrix} \neq 0. \quad (2.69)$$

**Exemplo 2.3.7.** Fixada uma base  $B$  de  $V$ , sejam os vetores  $\vec{u} = (2, 1, -3)_B$ ,  $\vec{v} = (1, -1, 2)_B$  e  $\vec{w} = (-2, 1, 1)_B$ . Como

$$\begin{vmatrix} u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \\ -3 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.70)$$

$$= -2 - 4 - 3 + 6 - 4 - 1 = -8 \neq 0. \quad (2.71)$$

Logo,  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  é uma sequência de vetores l.i..

### 2.3.3 Bases ortonormais

Uma base  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  é dita ser **ortonormal** se, e somente se,

- $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  são dois a dois ortogonais;
- $|\vec{a}| = |\vec{b}| = |\vec{c}| = 1$ .

**Observação 2.3.1.** (Teorema de Pitágoras) Se  $\vec{u} \perp \vec{v}$ , então  $|\vec{u} + \vec{v}|^2 = |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2$ .

**Proposição 2.3.1.** *Seja  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  uma base ortonormal e  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B$ . Então,  $|\vec{u}| = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$ .*

*Demonstração.* Temos  $|\vec{u}|^2 = |u_1\vec{i} + u_2\vec{j} + u_3\vec{k}|^2$ . Seja  $\pi$  um plano determinado por dadas representações de  $\vec{i}$  e  $\vec{j}$ . Como  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$  são ortogonais, temos que  $\vec{k}$  é ortogonal ao plano  $\pi$ . Além disso, o vetor  $u_1\vec{i} + u_2\vec{j}$  também admite uma representação em  $\pi$ , logo  $u_1\vec{i} + u_2\vec{j}$  é ortogonal a  $\vec{k}$ . Do Teorema de Pitágoras (Observação 2.3.1), temos

$$|\vec{u}|^2 = |u_1\vec{i} + u_2\vec{j}|^2 + |u_3\vec{k}|^2. \quad (2.72)$$

Analogamente, como  $\vec{i} \perp \vec{j}$ , do Teorema de Pitágoras segue

$$|\vec{u}|^2 = |u_1\vec{i}|^2 + |u_2\vec{j}|^2 + |u_3\vec{k}|^2 \quad (2.73)$$

$$= |u_1|^2|\vec{i}|^2 + |u_2|^2|\vec{j}|^2 + |u_3||\vec{k}|^2 \quad (2.74)$$

$$= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2. \quad (2.75)$$

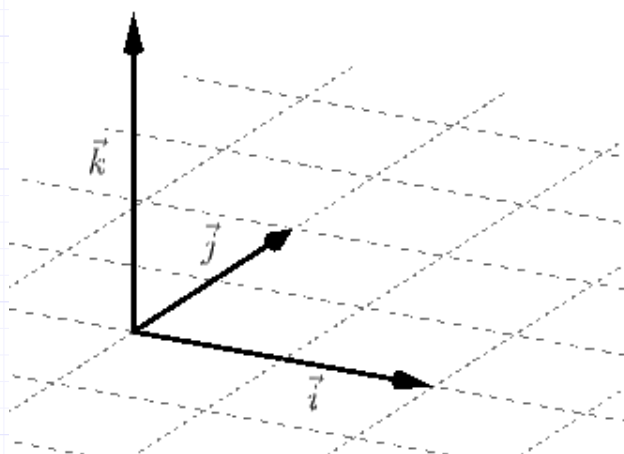
Extraindo a raiz quadrada de ambos os lados da última equação, obtemos o resultado desejado.  $\square$

**Exemplo 2.3.8.** Se  $\vec{u} = (-1, 2, -\sqrt{2})_B$  e  $B$  é uma base ortonormal, então

$$|\vec{u}| = \sqrt{(-1)^2 + 2^2 + (-\sqrt{2})^2} = \sqrt{7}. \quad (2.76)$$

### Exercícios resolvidos

**ER 2.3.1.** Considere a base  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  conforme a figura abaixo. Faça uma representação do vetor  $\vec{u} = (2, \frac{1}{2}, 1)_B$ .

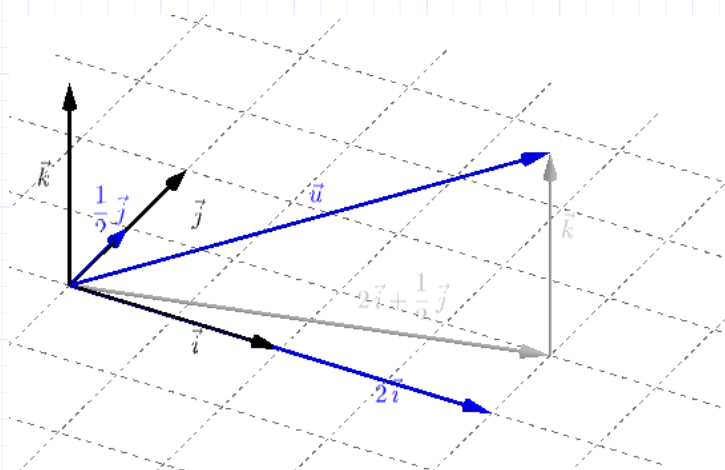


**Solução.** Primeiramente, observamos que

$$\vec{u} = (2, 1, 1)_B \quad (2.77)$$

$$= 2\vec{i} + \frac{1}{2}\vec{j} + \vec{k}. \quad (2.78)$$

Assim sendo, podemos construir uma representação de  $\vec{u}$  como dada na figura abaixo. Primeiramente, podemos representar os vetores  $2\vec{i}$  e  $\frac{1}{2}\vec{j}$  (azul). Então, representamos o vetor  $2\vec{i} + \frac{1}{2}\vec{j}$  (cinza). Por fim, temos a representação de  $\vec{u}$  (azul).



◇

**ER 2.3.2.** Fixada uma base qualquer  $B$  e dados  $\vec{u} = (1, -1, 2)_B$  e  $\vec{v} = (-2, 1, -1)_B$ , encontre o vetor  $\vec{x}$  que satisfaça

$$\vec{u} + 2\vec{x} = \vec{v} - (\vec{x} + \vec{u}). \quad (2.79)$$

**ER 2.3.3.** Primeiramente, podemos manipular a equação de forma a isolarmos  $\vec{x}$  como segue

$$\vec{u} + 2\vec{x} = \vec{v} - (\vec{x} + \vec{u}) \quad (2.80)$$

$$2\vec{x} = -\vec{u} + \vec{v} - \vec{x} - \vec{u} \quad (2.81)$$

$$3\vec{x} = \vec{v} - 2\vec{u} \quad (2.82)$$

$$\vec{x} = \frac{1}{3}\vec{v} - \frac{2}{3}\vec{u} \quad (2.83)$$

Agora, sabendo que  $\vec{u} = (1, -1, 2)_B$  e  $\vec{v} = (-2, 1, -1)_B$ , temos

$$\vec{x} = \frac{1}{3}(-2, 1, -1)_B - \frac{2}{3}(1, -1, 2)_B \quad (2.84)$$

$$\vec{x} = \left(-\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, -\frac{1}{3}\right)_B - \left(\frac{2}{3}, -\frac{2}{3}, \frac{4}{3}\right)_B \quad (2.85)$$

$$\vec{x} = \left(-\frac{2}{3} - \frac{2}{3}, \frac{1}{3} + \frac{2}{3}, -\frac{1}{3} - \frac{4}{3}\right) \quad (2.86)$$

$$\vec{x} = \left(-\frac{4}{3}, 1, -\frac{5}{3}\right)_B. \quad (2.87)$$

**ER 2.3.4.** Fixada uma base  $B$  qualquer, verifique se os vetores  $\vec{u} = (1, -1, 2)_B$ ,  $\vec{v} = (-2, 1, -1)_B$  e  $\vec{w} = (-4, 3, -5)$  formam uma base para o espaço  $V$ .

**Solução.** Uma base para o espaço tridimensional  $V$  é uma sequência de três vetores l.i.. Logo, para resolver a questão, basta verificar se  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  é l.i.. Com base na Subseção 2.3.2, basta calcularmos o determinante da matriz cujas colunas são formadas pelas coordenadas dos vetores da sequência, i.e.

$$\begin{vmatrix} u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 \end{vmatrix} \quad (2.88)$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & -2 & -4 \\ -1 & 1 & 3 \\ 2 & -1 & -5 \end{vmatrix} \quad (2.89)$$

$$= -5 - 4 - 12 - (-8 - 3 - 10) \quad (2.90)$$

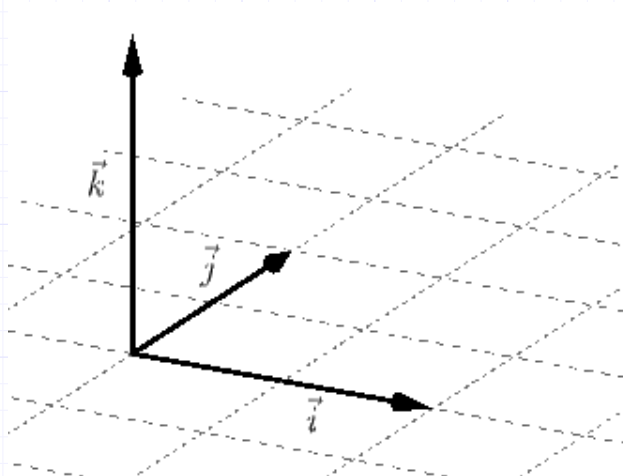
$$= -21 + 21 = 0. \quad (2.91)$$

Como este determinante é nulo, concluímos que  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  é l.d. e, portanto, não forma uma base para  $V$ .

◇

## Exercícios

**E.2.3.1.** Considere a base  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  conforme a figura abaixo. Faça uma representação do vetor  $\vec{u} = \left(1, -1, \frac{1}{2}\right)_B$ .



**E.2.3.2.** Fixada uma base  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  e sabendo que  $\vec{v} = (2, 0, -3)_B$ , escreva  $\vec{v}$  como combinação linear de  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$ .

**E.2.3.3.** Fixada uma base  $B$  qualquer e  $\vec{a} = (0, -1, 1)_B$ ,  $\vec{b} = (2, 0, -1)_B$  e  $\vec{c} = \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{3}, 1\right)_B$ , calcule:

- a)  $6\vec{c}$
- b)  $-\vec{b}$
- c)  $\vec{c} - \vec{b}$

d)  $2\vec{c} - (\vec{a} - \vec{b})$

**E.2.3.4.** Faxada uma base  $B$  qualquer, verifique se os seguintes conjuntos de vetores são l.i. ou l.d..

a)  $\vec{i} = (1, 0, 0)_B, \vec{j} = (0, 1, 0)_B$

b)  $\vec{a} = (1, 2, 0)_B, \vec{b} = (-2, -4, 1)_B$

c)  $\vec{a} = (1, 2, 0)_B, \vec{c} = (-2, -4, 0)_B$

d)  $\vec{i} = (1, 0, 0)_B, \vec{k} = (0, 0, 1)_B$

e)  $\vec{j} = (0, 1, 0)_B, \vec{k} = (0, 0, 1)_B$

f)  $\vec{a} = (1, 2, -1)_B, \vec{d} = (\frac{1}{2}, 1, -\frac{1}{2})_B$

**E.2.3.5.** Faxada uma base  $B$  qualquer, verifique se os seguintes conjuntos de vetores são l.i. ou l.d..

a)  $\vec{i} = (1, 0, 0)_B, \vec{j} = (0, 1, 0)_B, \vec{k} = (0, 0, 1)_B$

b)  $\vec{a} = (0, -1, 1)_B, \vec{b} = (2, 0, -1), \vec{c} = (\frac{1}{2}, -\frac{1}{3}, 1)_B$

c)  $\vec{u} = (0, -1, 1)_B, \vec{v} = (2, 0, -1), \vec{w} = (2, -1, 0)_B$

**E.2.3.6.** Seja  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  uma base ortogonal, i.e.  $\vec{a}, \vec{b}$  e  $\vec{c}$  são l.i. e dois a dois ortogonais. Mostre que  $C = (\vec{a}/|\vec{a}|, \vec{b}/|\vec{b}|, \vec{c}/|\vec{c}|)$  é uma base ortonormal.

## 2.4 Mudança de base

Sejam  $B = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  e  $C = (\vec{r}, \vec{s}, \vec{t})$  bases do espaço  $V$ . Conhecendo as coordenadas de um vetor na base  $C$ , queremos determinar suas coordenadas na base  $B$ . Mais especificamente, seja

$$\vec{z} = (z_1, z_2, z_3)_C \quad (2.92)$$

$$= z_1\vec{r} + z_2\vec{s} + z_3\vec{t}. \quad (2.93)$$



Agora, tendo  $\vec{r} = (r_1, r_2, r_3)_B$ ,  $\vec{s} = (s_1, s_2, s_3)_B$  e  $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)_B$ , então

$$(z_1, z_2, z_3)_C = z_1(r_1, r_2, r_3)_B \quad (2.94)$$

$$+ z_2(s_1, s_2, s_3)_B \quad (2.95)$$

$$+ z_3(t_1, t_2, t_3)_B \quad (2.96)$$

$$= \underbrace{(r_1 z_1 + s_1 z_2 + t_1 z_3)}_{z'_1} \vec{u} \quad (2.97)$$

$$+ \underbrace{(r_2 z_1 + s_2 z_2 + t_2 z_3)}_{z'_2} \vec{v} \quad (2.98)$$

$$+ \underbrace{(r_3 z_1 + s_3 z_2 + t_3 z_3)}_{z'_3} \vec{w} \quad (2.99)$$

o que é equivalente a

$$\begin{bmatrix} z'_1 \\ z'_2 \\ z'_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} r_1 & s_1 & t_1 \\ r_2 & s_2 & t_2 \\ r_3 & s_3 & t_3 \end{bmatrix}}_{M_{CB}} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}, \quad (2.100)$$

onde  $\vec{z} = (z'_1, z'_2, z'_3)_B$ .

A matriz  $M_{CB}$  é chamada de matriz de mudança de base de  $C$  para  $B$ . Como os vetores  $\vec{r}$ ,  $\vec{s}$  e  $\vec{t}$  são l.i., temos que a matriz de mudança de base  $M_{BC}$  tem determinante não nulo e, portanto é invertível. Portanto, multiplicando por  $M_{BC}^{-1}$  pela esquerda em (2.100), temos

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} r_1 & s_1 & t_1 \\ r_2 & s_2 & t_2 \\ r_3 & s_3 & t_3 \end{bmatrix}^{-1}}_{M_{BC}} \begin{bmatrix} z'_1 \\ z'_2 \\ z'_3 \end{bmatrix}, \quad (2.101)$$

ou seja

$$M_{BC} = (M_{CB})^{-1}. \quad (2.102)$$

**Exemplo 2.4.1.** Sejam dadas as bases  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  e  $C = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ , com  $\vec{u} = (1, 2, 0)_B$ ,  $\vec{v} = (2, 0, -1)_B$  e  $\vec{w} = (-1, -3, 1)_B$ . Seja, ainda, o vetor  $\vec{z} = (1, -2, 1)_B$ . Vamos encontrar as coordenadas de  $\vec{z}$  na base  $C$ .

Há duas formas de proceder.

**Método 1.**

A primeira consiste em resolver, de forma direta, a seguinte equação

$$(1, -2, 1)_B = (x, y, z)_C. \quad (2.103)$$

Esta é equivalente a

$$\vec{a} - 2\vec{b} + \vec{c} = x\vec{u} + y\vec{v} + z\vec{w} \quad (2.104)$$

$$= x(1, 2, 0)_B \quad (2.105)$$

$$+ y(2, 0, -1)_B \quad (2.106)$$

$$+ z(-1, -3, 1)_B \quad (2.107)$$

$$= x(\vec{a} + 2\vec{b}) \quad (2.108)$$

$$+ y(2\vec{a} - \vec{c}) \quad (2.109)$$

$$+ z(-\vec{a} - 3\vec{b} + \vec{c}) \quad (2.110)$$

$$= (x + 2y - z)\vec{a} \quad (2.111)$$

$$+ (2x - 3z)\vec{b} \quad (2.112)$$

$$+ (-y + z)\vec{c} \quad (2.113)$$

Isto nos leva ao seguinte sistema linear

$$\begin{cases} x + 2y - z = 1 \\ 2x - 3z = -2 \\ -y + z = 1 \end{cases} \quad (2.114)$$

Resolvendo este sistema, obtemos  $x = 7/5$ ,  $y = 3/5$  e  $z = 8/5$ , i.e.

$$\vec{z} = \left(\frac{7}{5}, \frac{3}{5}, \frac{8}{5}\right)_C. \quad (2.115)$$

**Método 2.**

Outra maneira de se obter as coordenadas de  $\vec{z}$  na base  $C$  é usando a matriz de mudança de base. A matriz de mudança da base  $C$  para a base  $B$  é

$$M_{CB} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 \end{bmatrix} \quad (2.116)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.117)$$

Entretanto, neste exemplo, queremos fazer a mudança de  $B$  para  $C$ . Portanto, calculamos a matriz de mudança de base  $M_{BC}$ . Segue:

$$M_{BC} = M_{CB}^{-1} \quad (2.118)$$

$$M_{BC} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & 0 & -3 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.119)$$

$$M_{BC} = \begin{bmatrix} \frac{3}{5} & \frac{1}{5} & \frac{6}{5} \\ \frac{12}{5} & -\frac{1}{5} & -\frac{1}{5} \\ \frac{11}{5} & -\frac{1}{5} & \frac{4}{5} \end{bmatrix} \quad (2.120)$$

Com esta matriz e denotando  $\vec{z} = (x, y, z)_C$ , temos

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{3}{5} & \frac{1}{5} & \frac{6}{5} \\ \frac{12}{5} & -\frac{1}{5} & -\frac{1}{5} \\ \frac{11}{5} & -\frac{1}{5} & \frac{4}{5} \end{bmatrix}}_{M_{BC}} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.121)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7/5 \\ 3/5 \\ 8/5 \end{bmatrix} \quad (2.122)$$

Logo, temos

$$\vec{z} = \left( \frac{7}{5}, \frac{3}{5}, \frac{8}{5} \right)_C. \quad (2.123)$$

## Exercícios resolvidos

**ER 2.4.1.** Sejam  $B$  e  $C$  bases dadas do espaço  $V$ . Sabendo que a matriz de mudança de base de  $B$  para  $C$  é

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.124)$$

calcule a matriz de mudança de base de  $C$  para  $B$ .

**Solução.** Sejam  $M_{BC} = M$  a matriz de mudança de base de  $B$  para  $C$  e  $M_{CB}$  a matriz de mudança de base de  $C$  para  $B$ . Temos

$$M_{CB} = M_{BC}^{-1} \quad (2.125)$$

$$M_{CB} = M^{-1} \quad (2.126)$$

$$M_{CB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.127)$$

$$M_{CB} = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} \\ -\frac{5}{6} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \quad (2.128)$$

◇

**ER 2.4.2.** Fixadas as mesmas bases do ER 2.4.1, determine as coordenadas do vetor  $\vec{u}$  na base  $C$ , sabendo que  $\vec{u} = (2, -1, -3)_B$ .

**Solução.** Denotando  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)_B$ , temos

$$\vec{u}_C = M_{BC}\vec{u}_B \quad (2.129)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -3 \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ -3 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (2.131)$$

◇

**ER 2.4.3.** Considere dadas as bases  $A$ ,  $B$  e  $C$ . Sejam, também,  $M_{AB}$  a matriz de mudança de base de  $A$  para  $B$  e  $M_{BC}$  a matriz de mudança de base de  $B$  para  $C$ . Determine a matriz de mudança de base de  $A$  para  $C$  em função das matrizes  $M_{AB}$  e  $M_{BC}$ .

**Solução.** Para um vetor  $\vec{u}$  qualquer, temos

$$\vec{u}_B = M_{AB}\vec{u}_A \quad (2.132)$$

$$\vec{u}_C = M_{BC}\vec{u}_B \quad (2.133)$$

Logo, temos

$$\vec{u}_C = M_{BC} (M_{AB} \vec{u}_A) \quad (2.134)$$

$$= (M_{BC} M_{AB}) \vec{u}_A. \quad (2.135)$$

Concluimos que  $M_{AC} = M_{BC} M_{AB}$ .

◇

## Exercícios

**E.2.4.1.** Sejam  $A$  e  $B$  bases dadas de  $V$  (espaço tridimensional). Sabendo que  $\vec{v} = (-2, 0, 1)_A$  e que a matriz de mudança de base

$$M_{AB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.136)$$

determine  $\vec{v}_B$ , i.e. as coordenadas de  $\vec{v}$  na base  $B$ .

**E.2.4.2.** Sejam  $A$  e  $B$  bases dadas de  $V$  (espaço tridimensional). Sabendo que  $\vec{v} = (-2, 0, 1)_B$  e que a matriz de mudança de base

$$M_{AB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.137)$$

determine  $\vec{v}_A$ , i.e. as coordenadas de  $\vec{v}$  na base  $A$ .

**E.2.4.3.** Sejam  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  e  $C = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  bases de  $V$  com

$$\vec{u} = (0, 1, 1)_B \quad (2.138)$$

$$\vec{v} = (1, 0, 1)_B \quad (2.139)$$

$$\vec{w} = (2, 1, -1)_B \quad (2.140)$$

Forneça a matriz de mudança de base  $M_{CB}$ .

**E.2.4.4.** Sejam  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  e  $C = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  bases de  $V$  com

$$\vec{a} = (0, 1, 1)_C \quad (2.141)$$

$$\vec{b} = (1, 0, 1)_C \quad (2.142)$$

$$\vec{c} = (2, 1, -1)_C \quad (2.143)$$

Forneça a matriz de mudança de base  $M_{CB}$ .

**E.2.4.5.** Sejam  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  e  $C = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  bases de  $V$  com

$$\vec{u} = (0, 1, 1)_B \quad (2.144)$$

$$\vec{v} = (1, 0, 1)_B \quad (2.145)$$

$$\vec{w} = (2, 1, -1)_B \quad (2.146)$$

Sabendo que  $\vec{d} = (0, -1, 2)_C$ , forneça  $\vec{d}_B$ , i.e. as coordenadas do vetor  $\vec{d}$  na base  $B$ .

**E.2.4.6.** Sejam  $B = (\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$  e  $C = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  bases de  $V$  com

$$\vec{u} = (0, 1, 1)_B \quad (2.147)$$

$$\vec{v} = (1, 0, 1)_B \quad (2.148)$$

$$\vec{w} = (2, 1, -1)_B \quad (2.149)$$

Sabendo que  $\vec{d} = (1, -2, 1)_B$ , forneça  $\vec{d}_C$ , i.e. as coordenadas do vetor  $\vec{d}$  na base  $C$ .

**E.2.4.7.** Considere dadas as bases  $A$ ,  $B$  e  $C$  do espaço tridimensional  $V$ . Sejam, também,  $M_{AB}$  a matriz de mudança de base de  $A$  para  $B$  e  $M_{CB}$  a matriz de mudança de base de  $C$  para  $B$ . Determine a matriz de mudança de base de  $A$  para  $C$  em função das matrizes  $M_{AB}$  e  $M_{CB}$ .

# Capítulo 3

## Produto escalar

### 3.1 Produto escalar

Ao longo desta seção, assumiremos  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  uma base ortonormal no espaço<sup>1</sup>. Por simplicidade de notação, vamos denotar as coordenadas de um vetor  $\vec{u}$  na base  $B$  por

$$\vec{u} = (u_1, u_2, u_3), \quad (3.1)$$

i.e.  $\vec{u} = u_1\vec{i} + u_2\vec{j} + u_3\vec{k}$ .

O **produto escalar** dos vetores  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$  e  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$  é o número real

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3. \quad (3.2)$$

**Exemplo 3.1.1.** Se  $\vec{u} = (2, -1, 3)$  e  $\vec{v} = (-3, -4, 2)$ , então

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = 2 \cdot (-3) + (-1) \cdot (-4) + 3 \cdot 2 = 4. \quad (3.3)$$

#### 3.1.1 Propriedades do produto escalar

Quaisquer que sejam  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$  e qualquer número real  $\alpha$ , temos:

- **Comutatividade:**

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \vec{v} \cdot \vec{u} \quad (3.4)$$

---

<sup>1</sup> $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  é l.i.,  $|\vec{i}| = 1$ ,  $|\vec{j}| = 1$ ,  $|\vec{k}| = 1$  e dois a dois ortogonais. Veja Subseção 2.3.3.

Dem.:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = (u_1, u_2, u_3) \cdot (v_1, v_2, v_3) \quad (3.5)$$

$$= u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 \quad (3.6)$$

$$= v_1u_1 + v_2u_2 + v_3u_3 \quad (3.7)$$

$$= \vec{v} \cdot \vec{u}. \quad (3.8)$$

• **Associatividade com a multiplicação por escalar:**

$$(\alpha\vec{u}) \cdot \vec{v} = \vec{u} \cdot (\alpha\vec{v}) = \alpha(\vec{u} \cdot \vec{v}) \quad (3.9)$$

Dem.:

$$(\alpha\vec{u}) \cdot \vec{v} = (\alpha u_1, \alpha u_2, \alpha u_3) \cdot (v_1, v_2, v_3) \quad (3.10)$$

$$= (\alpha u_1)v_1 + (\alpha u_2)v_2 + (\alpha u_3)v_3 \quad (3.11)$$

$$= \alpha(u_1v_1) + \alpha(u_2v_2) + \alpha(u_3v_3) \quad (3.12)$$

$$= \alpha(u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3) = \alpha(\vec{u} \cdot \vec{v}) \quad (3.13)$$

$$= u_1(\alpha v_1) + u_2(\alpha v_2) + u_3(\alpha v_3) \quad (3.14)$$

$$= (u_1, u_2, u_3) \cdot (\alpha v_1, \alpha v_2, \alpha v_3) \quad (3.15)$$

$$= \vec{u} \cdot (\alpha\vec{v}). \quad (3.16)$$

• **Distributividade com a adição:**

$$\vec{u} \cdot (\vec{v} + \vec{w}) = \vec{u} \cdot \vec{v} + \vec{u} \cdot \vec{w} \quad (3.17)$$

Dem.:

$$\vec{u} \cdot (\vec{v} + \vec{w}) = (u_1, u_2, u_3) \cdot ((v_1, v_2, v_3) + (w_1, w_2, w_3)) \quad (3.18)$$

$$= (u_1, u_2, u_3) \cdot [(v_1 + w_1, v_2 + w_2, v_3 + w_3)] \quad (3.19)$$

$$= u_1(v_1 + w_1) + u_2(v_2 + w_2) + u_3(v_3 + w_3) \quad (3.20)$$

$$= u_1v_1 + u_1w_1 + u_2v_2 + u_2w_2 + u_3v_3 + u_3w_3 \quad (3.21)$$

$$= u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 + u_1w_1 + u_2w_2 + u_3w_3 \quad (3.22)$$

$$= \vec{u} \cdot \vec{v} + \vec{u} \cdot \vec{w}. \quad (3.23)$$

• **Sinal:**

$$\vec{u} \cdot \vec{u} \geq 0, \quad \text{e} \quad (3.24)$$



$$\vec{u} \cdot \vec{u} = 0 \Leftrightarrow \vec{u} = \vec{0} \quad (3.25)$$

Dem.:

$$\vec{u} \cdot \vec{u} = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \geq 0. \quad (3.26)$$

Além disso, observamos que a soma de números não negativos é nula se, e somente se, os números forem zeros.

- **Norma:**

$$|\vec{u}|^2 = \vec{u} \cdot \vec{u} \quad (3.27)$$

Dem.: Como fixamos uma base ortonormal  $B$ , a Proposição 2.3.1 nos garante que

$$|\vec{u}|^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 = \vec{u} \cdot \vec{u}. \quad (3.28)$$

**Exemplo 3.1.2.** Sejam  $\vec{u} = (-1, 2, 1)$ ,  $\vec{v} = (2, -1, 3)$  e  $\vec{w} = (1, 0, -1)$ . Vejamos se as propriedades se verificam para estes vetores.

- Comutatividade:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = -1 \cdot 2 + 2 \cdot (-1) + 1 \cdot 3 = -1 \quad (3.29)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{u} = 2 \cdot (-1) + (-1) \cdot 2 + 3 \cdot 1 = -1 \quad \checkmark \quad (3.30)$$

- Associatividade com a multiplicação por escalar:

$$(2\vec{u}) \cdot \vec{v} = (-2, 4, 2) \cdot (2, -1, 3) = -4 - 4 + 6 = -2 \quad (3.31)$$

$$2(\vec{u} \cdot \vec{v}) = 2(-2 - 2 + 3) = -2 \quad \checkmark \quad (3.32)$$

$$\vec{u} \cdot (2\vec{v}) = (-1, 2, 1) \cdot (4, -2, 6) = -2 \quad \checkmark \quad (3.33)$$

- Distributividade com a adição:

$$\vec{u} \cdot (\vec{v} + \vec{w}) = (-1, 2, 1) \cdot (3, -1, 2) = -3 - 2 + 2 = -3 \quad (3.34)$$

$$\vec{u} \cdot \vec{v} + \vec{u} \cdot \vec{w} = (-2 - 2 + 3) + (-1 + 0 - 1) = -3 \quad \checkmark \quad (3.35)$$

- Sinal:

$$\vec{w} \cdot \vec{w} = 1 + 0 + 1 = 2 \geq 0 \quad \checkmark \quad (3.36)$$

- Norma:

$$|\vec{u}|^2 = (-1)^2 + 2^2 + 1^2 = 6 \quad (3.37)$$

$$\vec{u} \cdot \vec{u} = (-1) \cdot (-1) + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 6 \quad \checkmark \quad (3.38)$$

**Exercícios resolvidos****ER 3.1.1.** Sejam

$$\vec{u} = (-1, 0, 1) \quad (3.39)$$

$$\vec{v} = (0, 2, 1) \quad (3.40)$$

$$\vec{w} = (2, -1, -1) \quad (3.41)$$

calcule  $\vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - 2\vec{u} \cdot \vec{w}$ .**Solução.** Vamos começar calculando o último termo.

$$\vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - 2\vec{u} \cdot \vec{w} \quad (3.42)$$

$$= \vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - 2(-1, 0, 1) \cdot (2, -1, -1) \quad (3.43)$$

Calculamos  $2(-1, 0, 1) = (-2, 0, 2)$ , logo, temos

$$\vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - (-2, 0, 2) \cdot (2, -1, -1) \quad (3.44)$$

$$= \vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - (-2 \cdot 2 + 0 \cdot (-1) + 2 \cdot (-1)) \quad (3.45)$$

$$= \vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - (-4 - 2) \quad (3.46)$$

Agora, para o primeiro termo, podemos usar a propriedade distributiva, como segue

$$2\vec{w} \cdot \vec{u} - \vec{w} \cdot \vec{w} + 6 \quad (3.47)$$

$$= 2(2, -1, -1) \cdot (-1, 0, 1) - |\vec{w}|^2 + 6 \quad (3.48)$$

$$= 2(-2 + 0 - 1) - (2^2 + (-1)^2 + (-1)^2) + 6 \quad (3.49)$$

$$= -6 - 6 + 6 \quad (3.50)$$

$$= -6 \quad (3.51)$$

Com isso, concluímos que  $\vec{w} \cdot (2\vec{u} - \vec{w}) - 2\vec{u} \cdot \vec{w} = -6$ .

◇

**ER 3.1.2.** Sendo  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  uma base ortonormal, mostre que o produto interno entre vetores distintos de  $B$  é igual a zero. Ainda, o produto interno de um vetor de  $B$  por ele mesmo é igual a 1.

**Solução.** Calculamos o produto interno entre vetores diferentes:

$$\vec{i} \cdot \vec{j} = (1, 0, 0) \cdot (0, 1, 0) \quad (3.52)$$

$$= 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \quad (3.53)$$

$$= 0 \quad \checkmark \quad (3.54)$$

$$= \vec{j} \cdot \vec{i} \quad (3.55)$$

$$\vec{i} \cdot \vec{k} = (1, 0, 0) \cdot (0, 0, 1) \quad (3.56)$$

$$= 1 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \quad (3.57)$$

$$= 0 \quad \checkmark \quad (3.58)$$

$$= \vec{k} \cdot \vec{i} \quad (3.59)$$

$$\vec{j} \cdot \vec{k} = (0, 1, 0) \cdot (0, 0, 1) \quad (3.60)$$

$$= 0 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \quad (3.61)$$

$$= 0 \quad \checkmark \quad (3.62)$$

$$= \vec{k} \cdot \vec{j} \quad (3.63)$$

Por fim, verificamos os casos do produto interno de um vetor por ele mesmo:

$$\vec{i} \cdot \vec{i} = 1^2 + 0^2 + 0^2 = 1 \quad \checkmark \quad (3.64)$$

$$\vec{j} \cdot \vec{j} = 0^2 + 1^2 + 0^2 = 1 \quad \checkmark \quad (3.65)$$

$$\vec{k} \cdot \vec{k} = 0^2 + 0^2 + 1^2 = 1 \quad \checkmark \quad (3.66)$$

◇

## Exercícios

**E.3.1.1.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$  e  $\vec{v} = (1, -3, 2)$ , calcule:

a)  $\vec{u} \cdot \vec{v}$

b)  $\vec{v} \cdot \vec{u}$

c)  $2\vec{u} \cdot \vec{v}$

d)  $\vec{u} \cdot (2\vec{v})$

**E.3.1.2.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$ , calcule:

a)  $\vec{u} \cdot \vec{i}$

b)  $\vec{u} \cdot \vec{j}$

c)  $2\vec{u} \cdot \vec{k}$

**E.3.1.3.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$ ,  $\vec{v} = (1, -3, 2)$  e  $\vec{w} = (-2, -1, -3)$ , calcule:

a)  $\vec{u} \cdot (\vec{w} + \vec{v})$

b)  $\vec{v} \cdot (\vec{v} - 2\vec{u})$

**E.3.1.4.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$ ,  $\vec{v} = (1, -3, 2)$  e  $\vec{w} = (-2, -1, -3)$ , calcule:

a)  $|\vec{u}|$

b)  $|\vec{u} + \vec{v}|$

c)  $|\vec{u} \cdot \vec{w}|$

**E.3.1.5.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$ ,  $\vec{v} = (1, -3, 2)$  e  $\vec{w} = (-2, -1, -3)$ , encontre o vetor  $\vec{x}$  que satisfaz as seguintes condições:

$$\vec{u} \cdot \vec{x} = -1 \quad (3.67)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{x} = 2 \quad (3.68)$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} = -4 \quad (3.69)$$

$$(3.70)$$

**E.3.1.6.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$  e  $\vec{v} = (1, -3, 2)$ , encontre o vetor  $\vec{x}$  que satisfaz as seguintes condições:

$$\vec{u} \cdot \vec{x} = 0 \quad (3.71)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{x} = 0 \quad (3.72)$$

**E.3.1.7.** Sendo  $\vec{u} = (2, -1, 1)$ ,  $\vec{v} = (1, -3, 2)$  e  $\vec{w} = (-2, -1, -3)$ , encontre o vetor  $\vec{x}$  que satisfaz as seguintes condições:

$$\vec{u} \cdot \vec{x} = 0 \quad (3.73)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{x} = 0 \quad (3.74)$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} = 0 \quad (3.75)$$

$$(3.76)$$

## 3.2 Ângulo entre dois vetores

O **ângulo formado entre dois vetores**  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  não nulos, é definido como o menor ângulo determinado entre quaisquer representações  $\vec{u} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{OB}$ .

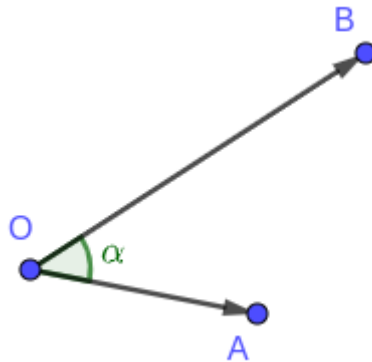


Figura 3.1: Ângulo entre dois vetores.

**Proposição 3.2.1.** Dados  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , temos

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| |\vec{v}| \cos \alpha, \quad (3.77)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo entre os vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ .

*Demonstração.* Tomamos as representações  $\vec{u} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{OB}$ . Observamos que  $\vec{u} - \vec{v} = \overrightarrow{BA}$ . Então, aplicando a lei dos cossenos no triângulo  $\triangle OAB$ , obtemos

$$|\overrightarrow{BA}|^2 = |\overrightarrow{OA}|^2 + |\overrightarrow{OB}|^2 - 2|\overrightarrow{OA}||\overrightarrow{OB}| \cos \alpha, \quad (3.78)$$

ou, equivalentemente,

$$|\vec{u} - \vec{v}|^2 = |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 - 2|\vec{u}||\vec{v}|\cos\alpha \quad (3.79)$$

$$(\vec{u} - \vec{v}) \cdot (\vec{u} - \vec{v}) = |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 - 2|\vec{u}||\vec{v}|\cos\alpha \quad (3.80)$$

$$\vec{u} \cdot \vec{u} - 2\vec{u} \cdot \vec{v} + \vec{v} \cdot \vec{v} = |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 - 2|\vec{u}||\vec{v}|\cos\alpha \quad (3.81)$$

$$|\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 - 2\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 - 2|\vec{u}||\vec{v}|\cos\alpha \quad (3.82)$$

donde

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}||\vec{v}|\cos\alpha. \quad (3.83)$$

□

**Exemplo 3.2.1.** Vamos determinar ângulo entre os vetores  $\vec{u} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0\right)$  e  $\vec{v} = \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0\right)$ . Da Proposição 3.2.1, temos

$$\cos\alpha = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \quad (3.84)$$

$$\cos\alpha = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 + 0^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + 0^2}} \quad (3.85)$$

$$\cos\alpha = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{1 \cdot 1} = \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3.86)$$

Portanto, temos  $\alpha = \pi/6$ .

**Observação 3.2.1.** O ângulo entre dois vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  é:

- **agudo** se, e somente se,  $\vec{u} \cdot \vec{v} > 0$ ;
- **obtuso** se, e somente se,  $\vec{u} \cdot \vec{v} < 0$ .

De fato, de (3.77), temos que o sinal de  $\vec{u} \cdot \vec{v}$  é igual ao sinal de  $\cos\alpha$  (o cosseno do ângulo entre os vetores). Também, por definição,  $0 \leq \alpha \leq \pi$ . Logo, se  $\cos\alpha > 0$ , então  $0 < \alpha < \pi/2$  (ângulo agudo) e, se  $\cos\alpha < 0$ , então  $\pi/2 < \alpha < \pi$  (ângulo obtuso).

**Observação 3.2.2.** (Vetores ortogonais) Se  $\vec{u}, \vec{v} \neq \vec{0}$ , então:

- $\vec{u} \perp \vec{v}$  se, e somente se,  $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$ .

De fato, seja  $\alpha$  o ângulo entre  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Se  $\vec{u} \perp \vec{v}$ , então  $\alpha = \pi/2$  e

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}||\vec{v}| \cos \alpha \quad (3.87)$$

$$= |\vec{u}||\vec{v}| \cos \left( \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.88)$$

$$= |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot 0 \quad (3.89)$$

$$= 0. \quad (3.90)$$

Reciprocamente, se  $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$ , então

$$\cos \alpha = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}||\vec{v}|} \quad (3.91)$$

$$= \frac{0}{|\vec{u}||\vec{v}|} \quad (3.92)$$

$$= 0. \quad (3.93)$$

Lembrando que  $0 \leq \alpha \leq \pi$ , segue que  $\alpha = \pi/2$ , i.e.  $\vec{u} \perp \vec{v}$ .

**Exemplo 3.2.2.** Os vetores  $\vec{i} = (1, 0, 0)$  e  $\vec{j} = (0, 1, 0)$  são ortogonais. De fato, temos

$$\vec{i} \cdot \vec{j} = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 0 \quad (3.94)$$

$$= 0. \quad (3.95)$$

### 3.2.1 Desigualdade triangular

Dados dois vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  temos

$$|\vec{u} + \vec{v}| \leq |\vec{u}| + |\vec{v}|, \quad (3.96)$$

esta é conhecida como a **desigualdade triangular**. Para demonstrá-la, começamos observando que

$$|\vec{u} + \vec{v}|^2 = (\vec{u} + \vec{v}) \cdot (\vec{u} + \vec{v}) \quad (3.97)$$

$$= \vec{u} \cdot \vec{u} + \vec{v} \cdot \vec{v} + \vec{u} \cdot \vec{v} + \vec{v} \cdot \vec{u} \quad (3.98)$$

$$= |\vec{u}|^2 + |\vec{v}|^2 + 2\vec{u} \cdot \vec{v}. \quad (3.99)$$

Agora, vamos estimar  $\vec{u} \cdot \vec{v}$ . Pela Proposição 3.2.1, temos

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}||\vec{v}| \cos \alpha, \quad (3.100)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo entre  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Mas, então:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} \leq |\vec{u}||\vec{v}| |\cos \alpha|. \quad (3.101)$$

Daí, como  $|\cos \alpha| \leq 1$ , temos

$$\vec{u} \cdot \vec{v} \leq |\vec{u}||\vec{v}|, \quad (3.102)$$

a qual é chamada de **desigualdade de Cauchy-Schwarz**<sup>2</sup>.

### 3.2.2 Exercícios resolvidos

**ER 3.2.1.** Sejam  $\vec{u} = (x, -1, 2)$  e  $\vec{v} = (2, x, -3)$ . Determine  $x$  tal que

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \frac{1}{2}. \quad (3.103)$$

**Solução.** Da definição do produto escalar, temos

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 \quad (3.104)$$

$$\frac{1}{2} = 2x - x - 6 \quad (3.105)$$

$$x - 6 = \frac{1}{2} \quad (3.106)$$

$$x = \frac{1}{2} + 6 \quad (3.107)$$

$$x = \frac{13}{2}. \quad (3.108)$$

◇

**ER 3.2.2.** Determine  $x$  tal que  $\vec{u} = (-1, 0, x)$  seja ortogonal a  $\vec{v} = (1, 2, -1)$ .

**Solução.** Para que  $\vec{u} \perp \vec{v}$  devemos ter

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.109)$$

$$-1 + 0 - x = 0 \quad (3.110)$$

$$x = -1. \quad (3.111)$$

◇

<sup>2</sup>Augustin-Louis Cauchy, 1798-1857, matemático francês. Fonte: [Wikipédia](#). Hermann Schwarz, 1843-1921, matemático alemão. Fonte: [Wikipedia](#).



## Exercícios

**E.3.2.1.** Determine o ângulo entre os vetores  $\vec{u} = (1, 0, 1)$  e  $\vec{v} = (0, 0, 2)$ .

**E.3.2.2.** Seja  $\vec{v} = (1, 2, -1)$ . Determine a norma do vetor  $\vec{u}$  de mesma direção de  $\vec{v}$  e tal que  $\vec{u} \cdot \vec{v} = 2$ .

**E.3.2.3.** Se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são vetores unitários e  $\vec{u} \cdot \vec{v} = 1$ , então  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  têm a mesma direção e o mesmo sentido? Justifique sua resposta.

**E.3.2.4.** Se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são vetores tais que  $\vec{u} \cdot \vec{v} = -1$ , então  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  têm a mesma direção e sentidos opostos? Justifique sua resposta.

**E.3.2.5.** Encontre o vetor  $x$  ortogonal a  $\vec{u} = (1, -2, 0)$  e  $\vec{v} = (2, -1, 1)$  tal que  $\vec{x} \cdot (0, -1, 2) = 1$ .

## 3.3 Projeção ortogonal

Sejam dados os vetores  $\vec{u} = \overrightarrow{OA}$ ,  $\vec{v} = \overrightarrow{OB} \neq \vec{0}$ . Seja, ainda,  $P$  a interseção da reta perpendicular a  $OB$  que passa pelo ponto  $A$ . Observemos a Figura 3.2. Com isso, definimos a **projeção ortogonal de  $\vec{u}$  na direção de  $\vec{v}$**  por  $\overrightarrow{OP}$ . Denotamos

$$\overrightarrow{OP} = \text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}. \quad (3.112)$$

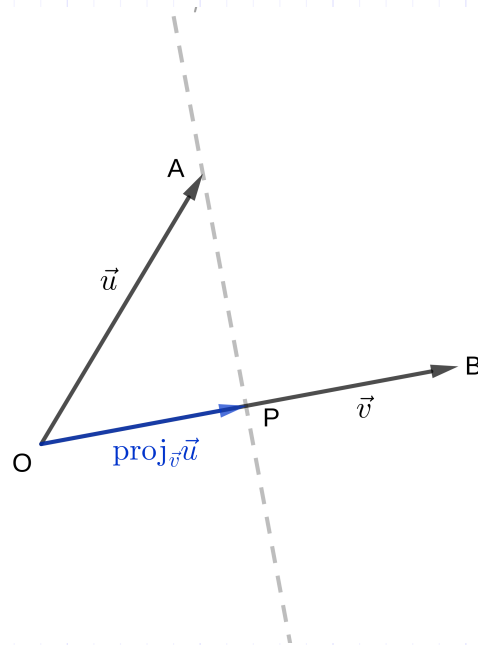


Figura 3.2: Ilustração da definição da projeção ortogonal.

Da definição, temos que<sup>3</sup>

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \beta \cdot \vec{v} \quad (3.113)$$

para algum número real  $\beta$ . Além disso, temos

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \vec{u} + \overrightarrow{AP}. \quad (3.114)$$

Portanto

$$\beta \vec{v} = \vec{u} + \overrightarrow{AP}. \quad (3.115)$$

Tomando o produto escalar com  $\vec{v}$  em ambos os lados desta equação, obtemos

$$\beta \vec{v} \cdot \vec{v} = \vec{u} \cdot \vec{v} + \overrightarrow{AP} \cdot \vec{v} \quad (3.116)$$

$$= \vec{u} \cdot \vec{v}, \quad (3.117)$$

pois  $\overrightarrow{AP} \perp \vec{v}$ . Daí, lembrando que  $\vec{v} \cdot \vec{v} = |\vec{v}|^2$ , temos

$$\alpha = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \quad (3.118)$$

---

<sup>3</sup> $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}$  é um vetor múltiplo por escalar de  $\vec{v}$ .

e concluímos que

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v}. \quad (3.119)$$

**Exemplo 3.3.1.** Sejam  $\vec{u} = (-1, 1, -1)$  e  $\vec{v} = (2, 1, -2)$ . Usando a equação (3.119), obtemos

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \frac{(-1, 1, -1) \cdot (2, 1, -2)}{|(2, 1, -2)|^2} (2, 1, -2) \quad (3.120)$$

$$= \frac{-2 + 1 + 2}{4 + 1 + 4} (2, 1, -2) \quad (3.121)$$

$$= \left( \frac{2}{9}, \frac{1}{9}, \frac{-2}{9} \right). \quad (3.122)$$

### Exercícios resolvidos

**ER 3.3.1.** Determine  $x$  tal que a projeção de  $\vec{u} = (1, x, x)$  em  $\vec{v} = (1, 1, 0)$  tenha o dobro da norma de  $\vec{v}$ .

**Solução.** De (3.119), a projeção de  $\vec{u}$  em  $\vec{v}$  é

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v}, \quad (3.123)$$

$$|\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}| = \left| \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \right| |\vec{v}| \quad (3.124)$$

$$|\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}| = \left| \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|} \right| \quad (3.125)$$

$$|\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}| = \frac{|1 + x|}{|\vec{v}|} \quad (3.126)$$

Queremos que

$$|\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}| = 2|\vec{v}|. \quad (3.127)$$

Segue que

$$\frac{|1 + x|}{|\vec{v}|} = 2|\vec{v}| \quad (3.128)$$

$$|1 + x| = 2|\vec{v}|^2 \quad (3.129)$$

$$|1 + x| = 2 \cdot 2 \quad (3.130)$$

$$1 + x = -4 \quad \text{ou} \quad 1 + x = 4 \quad (3.131)$$

$$x = -5 \quad \text{ou} \quad x = 3. \quad (3.132)$$

◇

**ER 3.3.2.** Verifique que se  $\vec{u} \perp \vec{v}$ , então  $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \vec{0}$ . Justifique sua resposta.

**Solução.** Temos que

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \vec{v}. \quad (3.133)$$

Tendo em vista que  $\vec{u} \perp \vec{v}$ , temos  $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$ . Logo,

$$\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = 0 \cdot \vec{v} \quad (3.134)$$

$$= \vec{0}. \quad (3.135)$$

◇

## Exercícios

**E.3.3.1.** Sejam  $\vec{u} = (-1, 1, 2)$  e  $\vec{v} = (1, -2, 0)$ . Calcule  $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}$ .

**E.3.3.2.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  vetores unitários e seja  $\alpha = \pi/6$  o ângulo entre eles. Calcule a norma da projeção ortogonal de  $\vec{u}$  na direção de  $\vec{v}$ .

**E.3.3.3.** Determine  $x$  tal que  $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = (1/6, -1/3, 1/6)$ , sendo  $\vec{u} = (x, 1, 2)$  e  $\vec{v} = (1, -2, 1)$ .

**E.3.3.4.** Verifique se a  $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u}$  tem o mesmo sentido de  $\vec{v}$  para quaisquer vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  dados. Justifique sua resposta.

**E.3.3.5.** Determine as coordenadas de todos os vetores  $\vec{u}$  tais que  $\text{proj}_{\vec{v}} \vec{u} = \vec{v}$ , sendo que  $\vec{v} = (1, 0, 0)$ .

## Capítulo 4

# Produto vetorial

De agora em diante, vamos trabalhar com um base ortonormal  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  dita com orientação positiva, i.e. os vetores  $\vec{i} = \overrightarrow{OI}$ ,  $\vec{j} = \overrightarrow{OJ}$  e  $\vec{k} = \overrightarrow{OK}$  estão dispostos em sentido anti-horário, veja Figura 4.1.

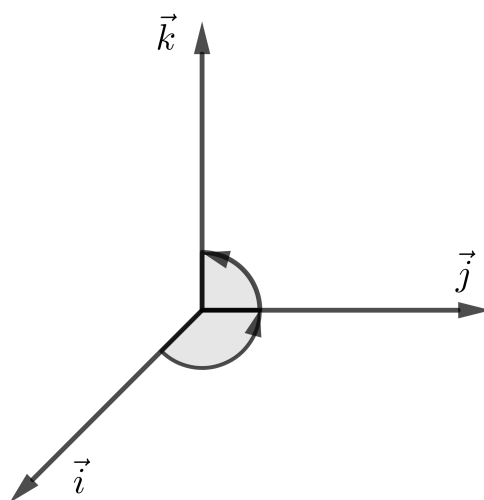


Figura 4.1: Base ortonormal positiva.

## 4.1 Definição

Dados vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , definimos o produto vetorial de  $\vec{u}$  com  $\vec{v}$ , denotado por  $\vec{u} \wedge \vec{v}$ , como o vetor:

- se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.d., então  $\vec{u} \wedge \vec{v} = \vec{0}$ .
- se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.i., então
  - $|\vec{u} \wedge \vec{v}| = |\vec{u}||\vec{v}| \sin \alpha$ , onde  $\alpha$  é o ângulo entre  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ ,
  - $\vec{u} \wedge \vec{v}$  é ortogonal a  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , e
  - $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  formam uma base positiva.

### 4.1.1 Interpretação geométrica

Sejam dados  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  l.i.. Estes vetores determinam um paralelogramo, veja Figura 4.2 (esquerda). Seja, então,  $h$  a altura deste paralelogramo tendo  $\vec{u}$  como sua base. Logo, a área do paralelogramo é o produto do comprimento da base com sua altura, neste caso

$$|\vec{u}|h = |\vec{u}||\vec{v}| \sin \alpha \quad (4.1)$$

$$= |\vec{u} \wedge \vec{v}| \quad (4.2)$$

Ou seja, o produto vetorial  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  tem norma igual à área do paralelogramo determinado por  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ .

Ainda, por definição,  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  é ortogonal a  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Isto nos dá a direção de  $\vec{u} \wedge \vec{v}$ . O sentido é, então, determinado pela definição de que  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{u} \wedge \vec{v})$  é uma base positiva. Veja a Figura 4.2 (direita).

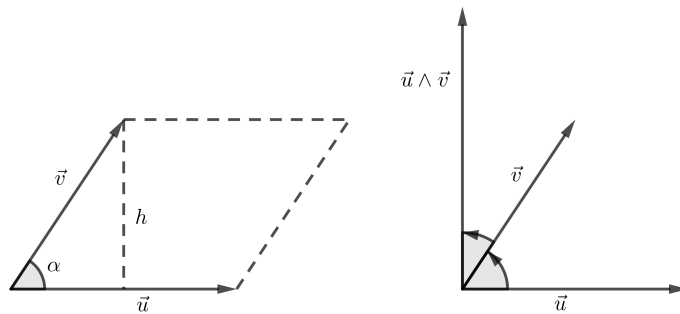


Figura 4.2: Interpretação do produto vetorial.

### 4.1.2 Produto vetorial via coordenadas

Dados  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$  e  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$  em uma base ortonormal positiva, então

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} u_1 & u_3 \\ v_1 & v_3 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \vec{k}. \quad (4.3)$$

**Observação 4.1.1.** Uma regra mnemônica, é

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix}. \quad (4.4)$$

**Exemplo 4.1.1.** Dados os vetores  $\vec{u} = (1, -2, 1)$  e  $\vec{v} = (0, 2, -1)$ , temos

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -1 \end{vmatrix} \quad (4.6)$$

$$= 0\vec{i} + \vec{j} + 2\vec{k} \quad (4.7)$$

$$= (0, 1, 2). \quad (4.8)$$

### Exercícios resolvidos

**ER 4.1.1.** Calcule  $\vec{x}$  tal que  $(0, 2, -1) \wedge \vec{x} = (-3, -1, -2)$ .

**Solução.** Denotando  $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ , temos

$$(0, 2, -1) \wedge \vec{x} = (-3, -1, -2) \quad (4.9)$$

$$\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 2 & -1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{vmatrix} = (-3, -1, -2) \quad (4.10)$$

$$(x_2 + 2x_3)\vec{i} - x_1\vec{j} - 2x_1\vec{k} = \quad (4.11)$$

$$-3\vec{i} - \vec{j} - 2\vec{k} \quad (4.12)$$

Segue que

$$x_2 + 2x_3 = -3$$

$$-x_1 = -1$$

$$-2x_1 = -2$$

Logo,  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = -3 - 2x_3$  e  $x_3$  é arbitrário. Concluimos que  $\vec{x} = (1, -3 - 2x_3, x_3)$  com  $x_3 \in \mathbb{R}$ .

◇

**ER 4.1.2.** Determine a área do paralelogramo determinado pelos vetores  $\vec{u} = (-1, 2, 3)$  e  $\vec{v} = (1, -2, 1)$ .

**Solução.** Tomando representações  $\vec{u} = \overrightarrow{OA}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{OC}$ , temos que  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  determinam um paralelogramo  $OABC$ , onde  $C$  é tal que  $\vec{u} + \vec{v} = \overrightarrow{OB}$ <sup>1</sup>. Da definição do produto vetorial, temos que

$$|\vec{u} \wedge \vec{v}| = |\vec{u}| |\vec{v}| \sin \alpha, \quad (4.13)$$

o que é igual a área do paralelogramo  $OABC$ , onde  $\alpha$  é o ângulo entre os vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Logo, a área do paralelogramo é

$$|\vec{u} \wedge \vec{v}| = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -1 & 2 & 3 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

$$|\vec{u} \wedge \vec{v}| = |(8, 4, 0)| \quad (4.15)$$

$$|\vec{u} \wedge \vec{v}| = 4\sqrt{5} \quad (4.16)$$

◇

## Exercícios

**E.4.1.1.** Sejam  $\vec{u} = (2, -3, 1)$  e  $\vec{v} = (1, -2, -1)$ . Calcule:

a)  $\vec{u} \wedge \vec{v}$ .

b)  $\vec{v} \wedge \vec{u}$ .

<sup>1</sup>Veja a regra do paralelogramo na Observação 1.2.5.



c)  $\vec{v} \wedge (2\vec{u})$ .

**E.4.1.2.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  tais que  $\vec{u} \wedge \vec{v} = (2, -1, 0)$ . Forneça  $\vec{v} \wedge \vec{u}$ . Justifique sua resposta.

**E.4.1.3.** Seja  $\vec{u}$  um vetor qualquer. Calcule  $\vec{u} \wedge \vec{u}$ .

**E.4.1.4.** Sejam  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  tais que  $(2\vec{u}) \wedge \vec{v} = (2, -1, 0)$ . Forneça  $\vec{v} \wedge \vec{u}$ . Justifique sua resposta.

**E.4.1.5.** Calcule  $\vec{x}$  tal que  $\vec{x} \wedge (2, -2, 3) = (11, 8, 2)$ .

**E.4.1.6.** Seja  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  uma base ortonormal positiva. Calcule:

a)  $\vec{i} \wedge \vec{j}$

b)  $\vec{j} \wedge \vec{k}$

c)  $\vec{k} \wedge \vec{i}$

## 4.2 Propriedades do produto vetorial

Nesta seção, discutiremos sobre algumas propriedades do produto vetorial. Para tanto, sejam dados os vetores  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ ,  $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ ,  $\vec{w} = (w_1, w_2, w_3)$  e o número real  $\gamma$ .

Da definição do produto vetorial, temos  $\vec{u} \perp (\vec{u} \wedge \vec{v})$  e  $\vec{v} \perp (\vec{u} \wedge \vec{v})$ , logo

$$\vec{u} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v}) = 0 \quad (4.17)$$

e

$$\vec{v} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v}) = 0. \quad (4.18)$$

**Exemplo 4.2.1.** Sejam  $\vec{u} = (1, -1, 2)$ ,  $\vec{v} = (2, -1, -2)$ . Temos

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} \quad (4.19)$$

$$= (4, 6, 1) \quad (4.20)$$

Segue, que

$$\vec{u} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v}) = (1, -1, 2) \cdot (4, 6, 1) \quad (4.21)$$

$$= 4 - 6 + 2 \quad (4.22)$$

$$= 0. \quad (4.23)$$

Em relação à multiplicação por escalar, temos

$$\gamma(\vec{u} \wedge \vec{v}) = (\gamma\vec{u}) \wedge \vec{v} \quad (4.24)$$

$$= \vec{u} \wedge (\gamma\vec{v}). \quad (4.25)$$

De fato,

$$(\gamma\vec{u}) \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \gamma u_1 & \gamma u_2 & \gamma u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \quad (4.26)$$

$$= \gamma \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} = \gamma(\vec{u} \wedge \vec{v}) \quad (4.27)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ \gamma v_1 & \gamma v_2 & \gamma v_3 \end{vmatrix} = \vec{u} \wedge (\gamma\vec{v}) \quad (4.28)$$

**Exemplo 4.2.2.** Sejam  $\vec{u} = (1, -1, 2)$  e  $\vec{v} = (2, -1, -2)$ . Temos

$$2(\vec{u} \wedge \vec{v}) = 2 \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} \quad (4.29)$$

$$= 2(4, 6, 1) \quad (4.30)$$

$$= (8, 12, 2) \quad (4.31)$$

$$(2\vec{u}) \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 2 & -2 & 4 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} \quad (4.32)$$

$$= (8, 12, 2) \quad (4.33)$$

$$\vec{u} \wedge (2\vec{v}) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 4 & -2 & -4 \end{vmatrix} \quad (4.34)$$

$$= (8, 12, 2) \quad (4.35)$$

Também, vale a **propriedade distributiva com a operação de soma**, i.e.

$$\vec{u} \wedge (\vec{v} + \vec{w}) = \vec{u} \wedge \vec{v} + \vec{u} \wedge \vec{w}. \quad (4.36)$$

De fato, temos

$$\vec{u} \wedge (\vec{v} + \vec{w}) \quad (4.37)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 + w_1 & v_2 + w_2 & v_3 + w_3 \end{vmatrix} \quad (4.38)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \quad (4.39)$$

$$= \vec{u} \wedge \vec{v} + \vec{u} \wedge \vec{w}. \quad (4.40)$$

**Exemplo 4.2.3.** Sejam  $\vec{u} = (1, -1, 2)$ ,  $\vec{v} = (2, -1, -2)$  e  $\vec{w} = (0, -1, -1)$ .  
Temos

$$\vec{u} \wedge (\vec{v} + \vec{w}) \quad (4.41)$$

$$= \vec{u} \wedge [(2, -1, -2) + (0, -1, -1)] = (1, -1, 2) \wedge (2, -2, -3) \quad (4.42)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 2 & -2 & -3 \end{vmatrix} \quad (4.43)$$

$$= (7, 7, 0) \quad (4.44)$$

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) + (\vec{u} \wedge \vec{w}) \quad (4.45)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad (4.46)$$

$$= (4, 6, 1) + (3, 1, -1) \quad (4.47)$$

$$= (7, 7, 0) \quad (4.48)$$

Observamos que o **produto vetorial não é comutativo**, entretanto

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = -\vec{v} \wedge \vec{u}. \quad (4.49)$$

De fato, temos

$$\vec{u} \wedge \vec{v} \quad (4.50)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \quad (4.51)$$

$$= - \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 \end{vmatrix} \quad (4.52)$$

$$= -\vec{v} \wedge \vec{u}. \quad (4.53)$$

**Exemplo 4.2.4.** Sejam  $\vec{u} = (1, -1, 2)$  e  $\vec{v} = (2, -1, -2)$ . Temos

$$\vec{u} \wedge \vec{v} \quad (4.54)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -2 \end{vmatrix} \quad (4.55)$$

$$= (4, 6, 1) \quad (4.56)$$

$$\vec{v} \wedge \vec{u} \quad (4.57)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 2 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & 2 \end{vmatrix} \quad (4.58)$$

$$= (-4, -6, -1) \quad (4.59)$$

Também, o **produto vetorial não é associativo** sendo  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}$ , em geral, é diferente de  $\vec{u} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{w})$ . Com efeito, temos

$$(\vec{i} \wedge \vec{i}) \wedge \vec{j} = \vec{0}, \quad (4.60)$$

$$\vec{i} \wedge (\vec{i} \wedge \vec{j}) = \vec{i} \wedge \vec{k} = -\vec{j}. \quad (4.61)$$

Por outro lado, suponhamos que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são l.i. e seja  $\pi$  um plano determinado por  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ . Então,  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  é ortogonal a  $\pi$ . Como  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}$  é

ortogonal a  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  e a  $\vec{w}$ , temos que  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}$  também pertence a  $\pi$ . Logo,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}$  são l.d. e existem  $\alpha$  e  $\beta$  tais que

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w} = \alpha \vec{u} + \beta \vec{v}. \quad (4.62)$$

Vamos determinar  $\alpha$  e  $\beta$ . Para tanto, consideremos uma base ortonormal  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  tal que  $\vec{i} \parallel \vec{u}$  e  $\vec{j} \in \pi$ . Nesta base, temos

$$\vec{u} = (u_1, 0, 0) \quad (4.63)$$

$$\vec{v} = (v_1, v_2, 0) \quad (4.64)$$

$$\vec{w} = (w_1, w_2, w_3). \quad (4.65)$$

Também, temos

$$\vec{u} \wedge \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & 0 & 0 \\ v_1 & v_2 & 0 \end{vmatrix} \quad (4.66)$$

$$= (0, 0, u_1 v_2) \quad (4.67)$$

e

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & u_1 v_2 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \quad (4.68)$$

$$= (-u_1 v_2 w_2, u_1 v_2 w_1, 0). \quad (4.69)$$

Daí, temos

$$\underbrace{(-u_1 v_2 w_2, u_1 v_2 w_1, 0)}_{(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}} = \underbrace{\alpha(u_1, 0, 0) + \beta(v_1, v_2, 0)}_{\alpha \vec{u} + \beta \vec{v}}, \quad (4.70)$$

donde

$$\alpha u_1 + \beta v_1 = -u_1 v_2 w_2, \quad (4.71)$$

$$\beta v_2 = u_1 w_1 v_2. \quad (4.72)$$

Resolvendo para  $\alpha$  e  $\beta$ , obtemos

$$\alpha = -v_1 w_1 - v_2 w_2 = -\vec{v} \cdot \vec{w} \quad (4.73)$$

$$\beta = \vec{u}\vec{w}. \quad (4.74)$$

Portanto, temos

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w} = -(\vec{v} \cdot \vec{w})\vec{u} + (\vec{u} \cdot \vec{w})\vec{v}. \quad (4.75)$$

Usando as identidades acima, obtemos

$$\vec{u} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{w}) = -(\vec{v} \wedge \vec{w}) \wedge \vec{u} \quad (4.76)$$

$$= (\vec{w} \cdot \vec{u})\vec{v} - (\vec{v} \cdot \vec{u})\vec{w} \quad (4.77)$$

$$= (\vec{u} \cdot \vec{w})\vec{v} - (\vec{u} \cdot \vec{v})\vec{w} \quad (4.78)$$

ou seja,

$$\vec{u} \wedge (\vec{v} \wedge \vec{w}) = (\vec{u} \cdot \vec{w})\vec{v} - (\vec{u} \cdot \vec{v})\vec{w}. \quad (4.79)$$

## Exercícios resolvidos

**ER 4.2.1.** Sejam  $\vec{u} = (-3, -2, -1)$ ,  $\vec{v} = (0, 1, 2)$  e  $\vec{w} = (-1, 0, 1)$ . Calcule

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w}. \quad (4.80)$$

**Solução.** Seguindo a identidade (4.76), segue

$$(\vec{u} \wedge \vec{v}) \wedge \vec{w} \quad (4.81)$$

$$= -(\vec{v} \cdot \vec{w})\vec{u} + (\vec{u} \cdot \vec{w})\vec{v} \quad (4.82)$$

$$= -(0 + 0 + 2)\vec{u} + (3 + 0 - 1)\vec{v} \quad (4.83)$$

$$= -2(-3, -2, -1) + 2(0, 1, 2) \quad (4.84)$$

$$= (6, 4, 2) + (0, 2, 4) \quad (4.85)$$

$$= (6, 6, 6) \quad (4.86)$$

◇

**ER 4.2.2.** Sejam  $\vec{u} = (2, x, 1)$ ,  $\vec{v} = (-2, 3, 1)$  e  $\vec{w} = (-3, -1, 1)$ . Calcule  $x$  tal que

$$\vec{v} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{w}) = -16. \quad (4.87)$$

**Solução.** Por cálculo direto, temos

$$\vec{v} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{w}) = -16 \quad (4.88)$$

$$\vec{v} \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 2 & x & 1 \\ -3 & -1 & 1 \end{vmatrix} = -16 \quad (4.89)$$

$$(-2, 3, 1) \cdot (x + 1, -5, 3x - 2) = -16 \quad (4.90)$$

$$x - 19 = -16 \quad (4.91)$$

$$x = 3. \quad (4.92)$$

◇

## Exercícios

**E.4.2.1.** Sejam  $\vec{u} = (2, -3, 1)$  e  $\vec{v} = (3, -2, 1)$ . Calcule  $\vec{u} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{u})$ . Se  $\vec{w}$  é um vetor qualquer, forneça o valor de  $\vec{u} \cdot (\vec{w} \wedge \vec{u})$ . Justifique sua resposta.

**E.4.2.2.** Sabendo que  $\vec{u} \wedge \vec{v} = (1, 1, 1)$ , calcule  $\vec{u} \wedge (2\vec{v})$ .

**E.4.2.3.** Sabendo que  $\vec{u} \wedge \vec{v} = (1, 1, 1)$  e  $\vec{u} \wedge \vec{w} = (-1, -1, -1)$ , calcule  $\vec{u} \wedge (\vec{v} + \vec{w})$ .

**E.4.2.4.** Sendo  $\vec{a} = (3, -1, 2)$ ,  $\vec{b} = (2, -1, -1)$ , calcule  $(\vec{a} \cdot \vec{k})(\vec{i} \wedge \vec{b})$ .

**E.4.2.5.** Calcule  $\vec{w} \wedge (\vec{u} \wedge \vec{v})$ , sendo  $\vec{u} = (1, -1, 2)$ ,  $\vec{v} = (0, -1, 1)$  e  $\vec{w} = (1, 0, -1)$ .

# Capítulo 5

## Produto misto

Ao longo deste capítulo, assumiremos trabalhar com uma base ortonormal positiva  $B = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ .

### 5.1 Definição e propriedades

O **produto misto** de três vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$ , nesta ordem, é definido por

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] := \vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w}. \quad (5.1)$$

Em coordenadas, temos

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] := \vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w} \quad (5.2)$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \cdot \vec{w} \quad (5.3)$$

$$= \left( \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} u_1 & u_3 \\ v_1 & v_3 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} \vec{k} \right) \cdot (w_1, w_2, w_3) \quad (5.4)$$

$$= \begin{vmatrix} u_2 & u_3 \\ v_2 & v_3 \end{vmatrix} w_1 - \begin{vmatrix} u_1 & u_3 \\ v_1 & v_3 \end{vmatrix} w_2 + \begin{vmatrix} u_1 & u_2 \\ v_1 & v_2 \end{vmatrix} w_3 \quad (5.5)$$

$$= \begin{vmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{vmatrix} \quad (5.6)$$

$$= \begin{vmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \quad (5.7)$$



Ou seja, temos

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = \begin{vmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

**Exemplo 5.1.1.** Dados os vetores  $\vec{u} = (1, -1, 0)$ ,  $\vec{v} = (1, 0, 2)$  e  $\vec{w} = (1, -1, 1)$ , temos

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = \begin{vmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{vmatrix} \quad (5.9)$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.10)$$

$$= 1 \quad (5.11)$$

### 5.1.1 Interpretação geométrica

Consideramos uma base positiva  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ , com  $\vec{u} = \overrightarrow{AB}$ ,  $\vec{v} = \overrightarrow{AD}$  e  $\vec{w} = \overrightarrow{AH}$ . Conforme vemos na Figura 5.1, estes vetores determinam um paralelepípedo.

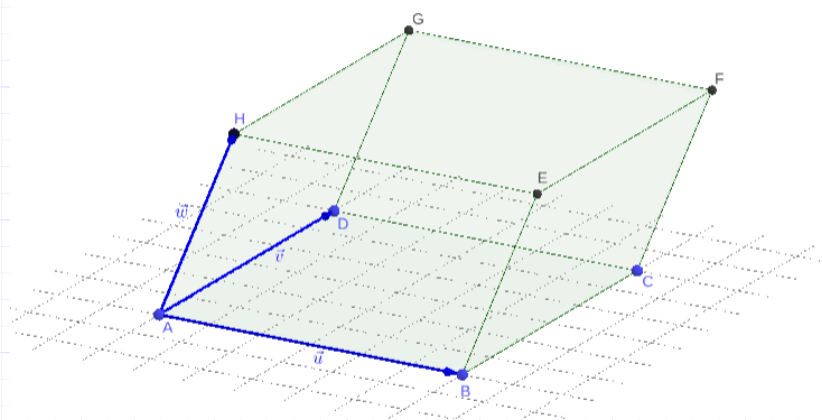


Figura 5.1: Interpretação geométrica do produto misto.

A base do paralelepípedo é o paralelogramo  $ABCD$  de área  $|\vec{u} \wedge \vec{v}|$ . Assim

sendo, o **volume do paralelepípedo** é

$$V = |\vec{u} \wedge \vec{v}| \cdot h, \quad (5.12)$$

onde  $h$  é a altura do prisma. Por sua vez,

$$h = |\text{proj}_{\vec{u} \wedge \vec{v}} \vec{w}| \quad (5.13)$$

$$= \left| \frac{\vec{w} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v})}{|\vec{u} \wedge \vec{v}|^2} \vec{u} \wedge \vec{v} \right| \quad (5.14)$$

$$= \frac{|\vec{w} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v})|}{|\vec{u} \wedge \vec{v}|^2} |\vec{u} \wedge \vec{v}| \quad (5.15)$$

$$= \frac{|\vec{w} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v})|}{|\vec{u} \wedge \vec{v}|} \quad (5.16)$$

Logo, retornando a (5.12), obtemos

$$V = |\vec{u} \wedge \vec{v}| \cdot h \quad (5.17)$$

$$= |\vec{u} \wedge \vec{v}| \cdot \frac{|\vec{w} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v})|}{|\vec{u} \wedge \vec{v}|} \quad (5.18)$$

$$= |\vec{w} \cdot (\vec{u} \wedge \vec{v})| \quad (5.19)$$

$$= |\vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w}|. \quad (5.20)$$

Ou seja, o **volume do paralelepípedo** formado pelos vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  é igual a norma do produto misto destes vetores, i.e.

$$V = |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]|. \quad (5.21)$$

**Exemplo 5.1.2.** Vamos calcular o volume do paralelepípedo determinado pelos vetores  $\vec{u} = (1, 1, 0)$ ,  $\vec{v} = (-1, 2, 0)$  e  $\vec{w} = (0, 1, 1)$ . De (5.21), temos

$$V = |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]| \quad (5.22)$$

$$= \left| \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \right| \quad (5.23)$$

$$= |3| = 3. \quad (5.24)$$

### 5.1.2 Propriedades

Valem as seguintes propriedades:

a)  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = -[\vec{v}, \vec{u}, \vec{w}]$

*Demonstração.* De fato, quando permutamos duas linhas em uma matriz, seu determinante troca de sinal.

b)  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = -[\vec{u}, \vec{w}, \vec{v}]$

*Demonstração.* Mesmo argumento da letra a).

c)  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{w}, \vec{u}, \vec{v}] = [\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}]$

*Demonstração.* De fato, cada caso acima corresponde a duas consecutivas permutações de linha na matriz associada ao produto misto.

d)  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = \vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w} = \vec{u} \cdot \vec{v} \wedge \vec{w}$

*Demonstração.* Isto segue de c), i.e.

$$[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{v}, \vec{w}, \vec{u}] \quad (5.25)$$

$$\vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w} = \vec{v} \wedge \vec{w} \cdot \vec{u} \quad (5.26)$$

$$= \vec{u} \cdot \vec{v} \wedge \vec{w}. \quad (5.27)$$

e)  $[\alpha \vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{u}, \alpha \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{u}, \vec{v}, \alpha \vec{w}] = \alpha [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]$

*Determinação.* De fato, ao multiplicarmos uma linha de uma matriz por um escalar  $\alpha$ , seu determinante fica multiplicado por  $\alpha$ .

f)  $[\vec{u} + \vec{z}, \vec{v}, \vec{w}] = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] + [\vec{z}, \vec{v}, \vec{w}]$

*Determinante.* Também segue da propriedade análoga do determinante de matrizes.

**Exemplo 5.1.3.** Sabendo que  $[\vec{u}, 2\vec{w}, \vec{v}] = 2$ , vamos calcular  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]$ . Do item e) acima, temos

$$2 = [\vec{u}, 2\vec{w}, \vec{v}] \quad (5.28)$$

$$= 2[\vec{u}, \vec{w}, \vec{v}], \quad (5.29)$$

donde

$$[\vec{u}, \vec{w}, \vec{v}] = 1. \quad (5.30)$$

Agora, do item b), temos

$$[\vec{u}, \vec{w}, \vec{v}] = -[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]. \quad (5.31)$$

Ou seja, concluímos que  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = -1$ .

Também, temos as seguintes propriedades envolvendo o produto misto:

- a) Se  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = 0$ , então  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  **não é base**.

*Demonstração.* Seja  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = 0$ , i.e.  $\vec{u} \wedge \vec{v} \cdot \vec{w} = 0$ . No caso de um dos vetores serem nulos, então  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  não é base. Suponhamos, então, que  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  são vetores não nulos. Isso implica que  $\vec{u} \wedge \vec{v} = 0$  ou  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \perp \vec{w}$ . No primeiro caso,  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são l.d. e, portanto,  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  não é base. No segundo caso,  $(\vec{u} \wedge \vec{v}) \perp \vec{w}$ , temos que  $\vec{w}$  é coplanar aos vetores  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , logo  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  não é base.

- b) Se  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] > 0$ , então  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  é uma **base positiva**.

*Demonstração.* Se  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] > 0$ , implica que o ângulo entre  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  e  $\vec{w}$  é agudo, o que garante que  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  seja uma base positiva.

- c) Se  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] < 0$ , então  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  é uma **base negativa**.

*Demonstração.* Se  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] < 0$ , implica que o ângulo entre  $\vec{u} \wedge \vec{v}$  e  $\vec{w}$  é obtuso, o que garante que  $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$  seja uma base negativa.

## Exercícios resolvidos

**ER 5.1.1.** Calcule a área do paralelogramo determinado pelos vetores  $\vec{v} = (1, 0, -2)$ ,  $\vec{w} = (1, -2, 1)$  e  $\vec{u} = (0, 2, 1)$ .

**Solução.** Da Subseção 5.1.1, temos que o volume do paralelogramo é

$$V = |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]|, \quad (5.32)$$

não importando a ordem dos vetores<sup>1</sup>. Assim sendo, temos

$$V = |[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]| \quad (5.33)$$

$$= \left| \begin{vmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} \right| \quad (5.34)$$

$$= |-8| = 8. \quad (5.35)$$

<sup>1</sup>A ordem dos vetores não altera o módulo do valor do produto misto.

◇

**ER 5.1.2.** Sejam  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  vetores dados. Verifique a seguinte afirmação:

$$[\vec{u}, \vec{v} + \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w}] = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}], \quad (5.36)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são quaisquer escalares.

**Solução.** Das propriedades do produto misto<sup>2</sup>, temos

$$[\vec{u}, \vec{v} + \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w}] \quad (5.37)$$

$$= [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] + [\vec{u}, \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w}]. \quad (5.38)$$

Agora, observamos que  $\alpha\vec{u} + \beta\vec{w}$  é combinação linear de  $\vec{u}$  e  $\vec{w}$ , logo  $(\vec{u}, \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w})$  é l.d. e, portanto,

$$[\vec{u}, \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w}] = 0. \quad (5.39)$$

Concluimos que

$$[\vec{u}, \vec{v} + \alpha\vec{u} + \beta\vec{w}, \vec{w}] = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]. \quad (5.40)$$

◇

## Exercícios

**E.5.1.1.** Calcule  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}]$  sendo  $\vec{u} = (-1, 0, 1)$ ,  $\vec{v} = (1, 3, 0)$  e  $\vec{w} = (1, -2, -1)$ .

**E.5.1.2.** Sejam  $\vec{a} = (0, 0, 2)$ ,  $\vec{d} = (-1, 1, 1)$  e  $\vec{e} = (1, 1, 1)$ . Calcule  $[\vec{d}, \vec{a}, \vec{e}]$ .

**E.5.1.3.** Sendo  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = 2$ , calcule  $[2\vec{u}, -3\vec{v}, \vec{w}]$ .

**E.5.1.4.** Sendo  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = 2$ , calcule  $[2\vec{u} - 5\vec{w}, -3\vec{v}, \vec{w}]$ .

**E.5.1.5.** Sejam  $\vec{u} = (0, x, 2)$ ,  $\vec{v} = (-1, 1, 1)$  e  $\vec{w} = (1, 1, 1)$ . Calcule  $x$  de forma que  $[\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] = 2$ .

---

<sup>2</sup> $[\vec{u}, \vec{v} + \vec{z}, \vec{w}] = [\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}] + [\vec{u}, \vec{z}, \vec{w}].$

# Resposta dos Exercícios

**E.1.1.4.** Falsa.

**E.1.1.5.** Dica:  $ABCD$  determina um paralelogramo.

**E.1.2.1.**  $\vec{w}, \vec{c}$

**E.1.2.2.** a), c), e)

**E.1.2.3.**  $\vec{d} \parallel \vec{e}; \vec{c} \parallel \vec{v} \parallel \vec{w}$

**E.1.2.4.**  $\vec{e} \perp \vec{n}; \vec{d} \perp \vec{n}; \vec{a} \perp \vec{m}$

**E.1.2.5.** a), b)

**E.1.2.6.** b), d)

**E.1.2.7.** a)  $\frac{1}{2}\vec{v}$ ; b)  $-\frac{2}{3}\vec{u}$ ; c)  $\frac{1}{2}\vec{v} + \frac{1}{3}\vec{u}$ ; d)  $\vec{v} + \frac{1}{3}\vec{u}$ ; e)  $-\frac{4}{3}\vec{u} - \frac{3}{2}\vec{v}$

**E.1.2.8.**  $|\vec{v}| = 1$ .

**E.1.2.9.** a) verdadeira; b) verdadeira.

**E.2.1.1.**  $\vec{u} = \vec{i} + 2\vec{j}$

**E.2.1.2.**  $\vec{u} = -3\vec{i} + \vec{j}$

**E.2.1.3.**  $\vec{u} = \vec{i} - \vec{j}$

**E.2.1.4.**  $\vec{w} = \frac{1}{3}\vec{u} - \frac{1}{3}\vec{v}$

**E.2.1.5.** Não.

**E.2.1.6.** Sim.

**E.2.1.7.** Não.

**E.2.1.8.** Sim.

**E.2.2.1.** Dica: os vetores  $\overrightarrow{AB}$  e  $\overrightarrow{BC}$  são l.d..

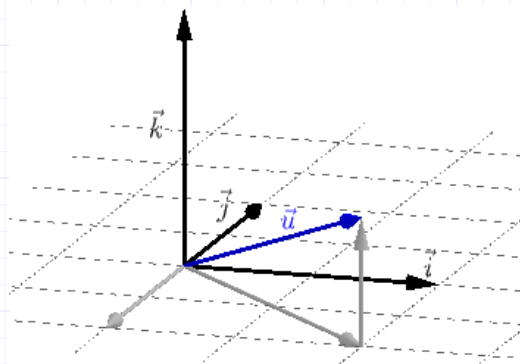
**E.2.2.2.** Dica: Escreva um dos vetores como combinação linear dos outros.

**E.2.2.3.** Três vetores são l.d. se, e somente se, eles são coplanares.

**E.2.2.4.** Não.

**E.2.2.5.** a) falsa; b) verdadeira; c) falsa; d) verdadeira.

**E.2.3.1.**



**E.2.3.2.**  $\vec{v} = 2\vec{i} + 0\vec{j} - 3\vec{k}$

**E.2.3.3.** a)  $6\vec{c} = (3, -2, 6)_B$ ; b)  $-\vec{b} = (-2, 0, 1)_B$ ; c)  $\vec{c} - \vec{b} = (-\frac{3}{2}, -\frac{1}{3}, 2)_B$ ;  
d)  $2\vec{c} - (\vec{a} - \vec{b}) = (3, \frac{1}{3}, 0)_B$

**E.2.3.4.** a) l.i.; b) l.i.; c) l.d.; d) l.i.; e) l.i.; f) l.d.

**E.2.3.5.** a) l.i.; b) l.i.; c) l.d.

**E.2.3.6.** Segue imediatamente do fato de que  $|\vec{u}/|u|| = 1$  para qualquer vetor  $\vec{u} \neq 0$ .

**E.2.4.1.**  $\vec{v} = (-3, -1, 2)_B$

**E.2.4.2.**  $\vec{v} = (0, 1, 2)_A$

**E.2.4.3.** 
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

**E.2.4.4.** 
$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{4} & \frac{3}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

**E.2.4.5.** 
$$\begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ -3 \end{bmatrix}$$

**E.2.4.6.** 
$$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \\ 2 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

**E.2.4.7.**  $M_{AC} = M_{CB}^{-1} M_{AB}$

**E.3.1.1.** a) 7; b) 7; c) 14; d) 14

**E.3.1.2.** a) 2; b) -1; c) 2

**E.3.1.3.** a) 1; b) 0;

**E.3.1.4.** a)  $\sqrt{6}$ ; b)  $\sqrt{34}$ ; c) 6;

**E.3.1.5.**  $x = (-23/16, 5/16, 35/16)$

**E.3.1.6.**  $x = \left(-\frac{1}{5}x_3, \frac{3}{5}x_3, x_3\right), x_3 \in \mathbb{R}$

**E.3.1.7.**  $x = \vec{0}$



**E.3.2.1.**  $\pi/4$

**E.3.2.2.**  $\frac{\sqrt{6}}{3}$

**E.3.2.3.** Sim.

**E.3.2.4.** Não necessariamente.

**E.3.2.5.**  $\vec{x} = (-2/7, -1/7, 3/7)$

**E.3.3.1.**  $(-3/5, 6/5, 0)$

**E.3.3.2.**  $\frac{\sqrt{3}}{2}$

**E.3.3.3.** 1

**E.3.3.4.** Falso

**E.3.3.5.**  $(1, u_2, u_3), u_1, u_2 \in \mathbb{R}$

**E.4.1.1.** a)  $(5, 3, -1)$ ; b)  $(-5, -3, 1)$ ; c)  $(-10, -6, 2)$

**E.4.1.2.**  $(-2, 1, 0)$

**E.4.1.3.** 0

**E.4.1.4.**  $(-1, 1/2, 0)$

**E.4.1.5.**  $\left(-\frac{2}{3}x_3 + \frac{8}{3}, \frac{2}{3}x_3 - \frac{11}{3}, x_3\right), x_3 \in \mathbb{R}$

**E.4.1.6.** a)  $\vec{k}$ ; b)  $\vec{i}$ ; c)  $\vec{j}$

**E.4.2.1.**  $\vec{u} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{u}) = 0$ ;  $\vec{u} \cdot (\vec{w} \wedge \vec{u}) = 0$

**E.4.2.2.**  $(2, 2, 2)$

**E.4.2.3.**  $(0, 0, 0)$

**E.4.2.4.**  $(0, 2, -2)$

**E.4.2.5.**  $(-1, 0, -1)$

**E.5.1.1.** -2

**E.5.1.2.** 4

**E.5.1.3.** -12

**E.5.1.4.** -12

**E.5.1.5.** 3