

Notas da disciplina MAT0264 - Anéis e Corpos

Prof. Vinicius Rodrigues

1. Pré-Requisitos Conjuntistas

Antes de descrevermos grupos, precisamos de algumas definições e resultados básicos envolvendo noções básicas sobre conjuntos e funções. Para isso, utilizaremos a notação usual de conjuntos, como $\mathcal{P}(X)$ para o conjunto das partes de X , X^n para o produto cartesiano de n cópias de X , e assim por diante.

Não é objetivo deste texto desenvolver a parte inicial da Teoria dos Conjuntos. Apenas apresentaremos algumas definições, notações e resultados básicos que utilizaremos ao longo do texto.

1.1. Operações.

DEFINIÇÃO 1.1 (Operações n -árias). Se X é um conjunto e $n \in \mathbb{N}$, uma operação n -ária em X é uma função $f : X^n \rightarrow X$.

Operações 2-árias e 1-árias são frequentemente chamadas de *binárias* e *unárias*, respectivamente.

Caso $*$ seja uma operação binária, a notação $x * y$ é frequentemente utilizada para denotar $x * y$.

Caso $*$ seja uma operação unária, a notação $*x$ é frequentemente utilizada para denotar $*(x)$.

1.2. Produto cartesiano de conjuntos generalizado. Famílias são funções com notação especial. Tal notação é utilizada quando pensamos em uma função como um “conjunto indexado de valores” ao invés de um “dispositivo de entrada/saída”.

Matematicamente, funções e famílias podem ser vistas como o mesmo objeto.

Conceito	Função	Família
Mapa	$u : I \rightarrow A$	$(u_i)_{i \in I} = (u_i : i \in I)$
Valor	$u(i)$	u_i
Imagem	$\text{ran } u$	$\{u_i : i \in I\}$
Intuição	objeto dinâmico	objeto estático
Inputs	domínio I	conjunto de índices I

TABELA 1. Comparativo de família e função

Exemplo: sequências. Uma sequência é uma família cujo conjunto de índices é \mathbb{N} . Compare a intuição que passa as notações:

- Considere a sequência $u = (\frac{1}{2^n})_{n \in \mathbb{N}}$.
- Considere a função $u : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $u(n) = \frac{1}{2^n}$.

Exemplo: sequências finitas. Se $n \geq 1$, identificamos $n = \{0, 1, \dots, n-1\}$. Assim:

- Uma família com n elementos é uma família $(a_i)_{i < n} = (a_i)_{i \in n} = (a_0, \dots, a_{n-1})$.

DEFINIÇÃO 1.2 (Produto cartesiano de conjuntos). Seja $(A_i)_{i \in I}$ uma família de conjuntos. O produto cartesiano de conjuntos é o conjunto $\prod_{i \in I} A_i$ definido como o conjunto de todas as famílias $(a_i : i \in I)$ tais que para cada $i \in I$, $a_i \in A_i$.

$$\prod_{i \in I} A_i = \{(a_i)_{i \in I} : \forall i \in I, a_i \in A_i\}.$$

DEFINIÇÃO 1.3 (Exponenciação de conjuntos). Sejam A, I conjuntos. O conjunto A^I é o conjunto de todas as funções de I em A . Ou seja, $A^I = \{f : I \rightarrow A\}$. Note que:

$$A^I = \prod_{i \in I} A = \{(a_i)_{i \in I} : \forall i \in I, a_i \in A\}.$$

Na notação anterior, se $n \geq 1$

$$A^n = \{(a_i)_{i < n} : \forall i < n \ a_i \in A\} = \{(a_0, \dots, a_{n-1}) : a_0, \dots, a_{n-1} \in A\} \approx A \times \dots \times A \text{ (} n \text{ vezes)}.$$

1.3. Produtos de anéis.

DEFINIÇÃO 1.4 (Produto Direto de dois anéis). Sejam R, S anéis. O produto direto de R e S é o conjunto $R \times S$ munido das operações “ponto à ponto”: dados $a = (a_1, a_2) \in R \times S$ e $b = (b_1, b_2) \in R \times S$, temos:

$$a + b = (a_1 + b_1, a_2 + b_2)$$

$$a \cdot b = (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2)$$

$$0 = (0_R, 0_S)$$

$$1 = (1_R, 1_S)$$

Exemplo: Seja $R = \mathbb{Z}_3$ e $S = \mathbb{Z}_4$. Então $(2, 2) \in R \times S$ e $(1, 2) \in R \times S$. Temos:

$$(2, 2) + (1, 2) = (2 + 1, 2 + 2) = (0, 0)$$

$$(2, 2) \cdot (2, 2) = (2 \cdot 2, 2 \cdot 2) = (1, 0)$$

2. Noções de Grupos

2.1. Definição e Propriedades Básicas.

DEFINIÇÃO 2.1. Um grupo é uma quadrupla (G, \cdot, e) , tal que G é um conjunto, \cdot é uma operação binária em G e $e \in G$, e satisfazem:

- **(Propriedade associativa)** $\forall a, b, c \in G \ (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$.
- **(Elemento neutro)** $\forall a \in G \ e \cdot a = a \cdot e = a$.
- **(Elemento inverso)** $\forall a \in G \ \exists b \in G \ a \cdot b = b \cdot a = e$.

Se, adicionalmente, a seguinte propriedade é satisfeita, o grupo é chamado de *comutativo*, ou, mais comunmente, *abeliano*:

- **(Comutatividade)** $\forall a, b \in G \ a \cdot b = b \cdot a$.

Algumas observações:

- Ao discursar sobre grupos, é comum omitir a operação e o elemento neutro, referindo-se apenas ao conjunto G .
- Caso o grupo seja abeliano, é comum que sua operação binária seja denotada por $+$ ou outro símbolo similar. Nesse contexto, o elemento neutro é frequentemente denotado por 0 .
- Caso o grupo não seja abeliano, é comum que sua operação binária seja denotada por \cdot ou outro símbolo similar. Nesse contexto, o elemento neutro é frequentemente denotado por e , e a operação é frequentemente omitida, ou seja, $a \cdot b$ é frequentemente escrito como ab .

Alguns exemplos:

- Com a soma usual, $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ são grupos abelianos.
- Com a multiplicação usual, o círculo unitário complexo $\mathbb{T} = \{x \in \mathbb{C} : |x| = 1\}$ é um grupo abeliano com elemento neutro 1 . De fato, o produto de complexos é comutativo, associativo e tem 1 como elemento neutro. Note que $1 \in \mathbb{T}$ e $0 \notin \mathbb{T}$. Se $x \in \mathbb{T}$, o inverso multiplicativo de x é dado por $\frac{\bar{x}}{|x|^2}$, onde \bar{x} denota o conjugado de x . Como $|\bar{x}| = |x| = 1$, segue que \mathbb{T} tem todos os inversos de todos seus elementos.
- Os inteiros módulo n ($n \geq 1$), dados por $\mathbb{Z}_n = \{0, \dots, n-1\}$ com a soma dada pela aritmética módulo n , são grupos.

Agora iniciaremos a provar algumas propriedades básicas sobre grupos.

PROPOSIÇÃO 2.2 (Unicidade do elemento neutro). Seja (G, \cdot, e) um grupo. Então, o elemento neutro e é único. Isto é, se $h \in G$ é tal que $\forall a \in G \ h \cdot a = a \cdot h = a$, então $h = e$.

DEMONSTRAÇÃO. Note que $h = he$, pois e é elemento neutro. Por outro lado, $e = he$, pois h é elemento neutro. Assim, $h = he = e$. \square

PROPOSIÇÃO 2.3 (Unicidade dos inversos). Seja (G, \cdot, e) um grupo. Então todo $a \in G$ possui um único elemento inverso, ou seja, para todo $g \in G$, é único. Isto é $\forall a \in G \ \exists! b \in G \ a \cdot b = b \cdot a = e$.

DEMONSTRAÇÃO. A existência do inverso é garantida pela definição de grupo. Para provar a unicidade, suponha que b, c são inversos de a , ou seja, $a \cdot b = b \cdot a = e$ e $a \cdot c = c \cdot a = e$. Então, temos:

$$b = be = b(ac) = (ba)c = ec = c.$$

\square

A unicidade do elemento neutro e dos inversos nos permite definir a notação a^{-1} para o inverso de a em um grupo (G, \cdot, e) . Caso $(G, +, 0)$ seja um grupo abeliano, a notação $-a$ é frequentemente utilizada para denotar o inverso de a , e, nesse caso, $-a$ é chamado de *oposto* de a .

Note que assim, ficam definidos operadores unários $()^{-1} : G \rightarrow G$ (ou $- : G \rightarrow G$). Para o segundo caso, define-se também que $a - b = a + (-b)$.

PROPOSIÇÃO 2.4 (Cancelamento). Seja (G, \cdot, e) um grupo. Então, se $a, b, c \in G$ e $a \cdot b = a \cdot c$, então $b = c$. Analogamente, se $b \cdot a = c \cdot a$, então $b = c$.

DEMONSTRAÇÃO. Provaremos a primeira afirmação. A segunda é análoga e fica como exercício. Suponha que $ba = ca$. Então $b = be = b(aa^{-1}) = (ba)a^{-1} = (ca)a^{-1} = c(aa^{-1}) = ce = c$. Assim, $b = c$. \square

COROLÁRIO 2.5 (Cancelamento II). Seja (G, \cdot, e) um grupo. Para todos $a, b \in G$, se $ab = a$, então $b = e$. Analogamente, se $ba = a$, então $b = e$.

DEMONSTRAÇÃO. Para a primeira afirmação, note que $ab = ae$, logo, pela proposição anterior, $b = e$. A segunda afirmação é análoga. \square

PROPOSIÇÃO 2.6 (Regras de sinal). Seja G um grupo e $a, b \in G$. Então:

- a) $((a)^{-1})^{-1} = a$ [na notação aditiva, $-(-a) = a$].
- b) $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$ [na notação aditiva, $-(a + b) = (-b) + (-a)$].
- c) $e^{-1} = e$ [na notação aditiva, $-0 = 0$].

DEMONSTRAÇÃO. a): Temos que $(a^{-1})^{-1}a^{-1} = e = aa^{-1}$. Cancelando a^{-1} , segue.

b): Temos que $(ab)^{-1}(ab) = e = (b^{-1}a^{-1})ab$. Cancelando ab , segue que $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$. Analogamente, $(ba)^{-1} = a^{-1}b^{-1}$.

c): Temos que $(e^{-1})e = e = ee$. Cancelando e à direita, segue. \square

2.2. Somatórios. Nessa seção, formalizaremos somatórios.

DEFINIÇÃO 2.7 (Soma de sequência finita). Seja G um conjunto munido de uma operação $+$ associativa, comutativa e com neutro 0 . Define-se, recursivamente para $n \geq 0$, o somatório de famílias $(a_i : i \in F)$, onde F é um conjunto de n índices e $a_i \in G$ para todo $i \in F$, como se segue:

- **Notação:** se $a = (a_i)_{i \in F}$ é uma sequência de elementos de G , então usamos as notações:

$$\sum a = \sum (a_i : i \in F) = \sum_{i \in F} a_i.$$

- Caso base $n = 0$: só existe uma família com 0 elementos, que é a família vazia $a = () = \emptyset = (a_i : i \in \emptyset)$. Definimos:

$$\sum a = 0$$

- Passo recursivo $n \rightarrow n + 1$: considere uma família $(a_i)_{i \in F}$, onde $|F| = n + 1$. Define-se:

$$\sum (a_i : i \in F) = \sum (a_i : i \in F \setminus \{j\}) + a_j,$$

onde $j \in I$ é qualquer elemento.

É claro que, para mostrar que a definição acima é consistente, precisamos mostrar que a soma não depende da escolha de j .

LEMA 2.8. Qualquer que seja o tamanho (finito) de F , $\sum (a_i)_{i \in F}$ está bem definido.

DEMONSTRAÇÃO. Seja F um conjunto finito. Se $|F| = 0$, então $F = \emptyset$, e a soma é 0. Se $|F| = 1$, então $F = \{j\}$ – só há uma escolha para j , e a soma é a_j . Se $|F| = n + 1$ para $n \geq 1$, tome $j, k \in F$. Devemos ver que $\left(\sum_{i \in F \setminus \{j\}} a_i\right) + a_j = \left(\sum_{i \in F \setminus \{k\}} a_i\right) + a_k$. Com efeito:

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i \in F \setminus \{j\}} a_i\right) + a_j &= \left(\left(\sum_{i \in F \setminus \{j, k\}} a_i\right) + a_k\right) + a_j = \left(\sum_{i \in F \setminus \{j, k\}} a_i\right) + (a_k + a_j) \\ &= \left(\sum_{i \in F \setminus \{j, k\}} a_i\right) + (a_j + a_k) = \left(\left(\sum_{i \in F \setminus \{j, k\}} a_i\right) + a_j\right) + a_k = \left(\sum_{i \in F \setminus \{k\}} a_i\right) + a_k. \end{aligned}$$

□

PROPOSIÇÃO 2.9. Seja G um conjunto munido de uma operação $+$ associativa, comutativa e com neutro 0. Seja $(a_i : i \in I)$ uma família finita em G e $\phi : J \rightarrow I$ uma função bijetora. Então:

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{j \in J} a_{\phi(j)}.$$

DEMONSTRAÇÃO. Novamente, procedemos por indução no tamanho de $|I| = |J|$. A base de tamanho 0 é trivial, já que ambos os lados da igualdade são 0.

Para o passo indutivo em que $|I| = |J| = n + 1$, considere $\phi : J \rightarrow I$ como no enunciado. Fixe $k \in J$ qualquer e sejam $I' = I \setminus \{\phi(k)\}$, $J' = J \setminus \{k\}$ e $\phi' = \phi|_{J'} : J' \rightarrow I'$, que é bijetora. Como $|J'| = |I'| = n$, por hipótese indutiva temos que $\sum_{j \in J'} a_{\phi(j)} = \sum_{i \in I'} a_i$. Segue que:

$$\sum_{j \in J} a_{\phi(j)} = \left(\sum_{j \in J'} a_{\phi(j)}\right) + a_{\phi(k)} = \left(\sum_{i \in I'} a_i\right) + a_{\phi(k)} = \sum_{j \in I} a_j.$$

□

3. Anéis

Nesta seção, começaremos a discutir a noção matemática de anel, uma das principais estruturas que serão estudadas.

DEFINIÇÃO 3.1 (Anel). Um anel é uma 4-upla $(A, +, \cdot, 0, 1)$ conjunto A com duas operações binárias, adição e multiplicação, denotadas por $+$ e \cdot , tais que:

- $(A, +, 0)$ é um grupo abeliano.
- (**Associatividade**) Para todo $a, b \in A$, temos $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$.
- (**Elemento identidade**) $\forall a \in A$ $1 \cdot a = a \cdot 1 = a$.
- (**Propriedades distributivas**) Para todos $a, b, c \in A$, temos:

$$a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c, \text{ e}$$

$$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$$

Se, adicionalmente, a seguinte propriedade é satisfeita, o anel é chamado de *comutativo*.

- (**Comutatividade**) $\forall a, b \in A$ $a \cdot b = b \cdot a$.

Algumas observações:

- Como em grupos, ao discursar sobre anéis é comum omitir as operações, referindo-se apenas ao conjunto A .
- Ao discursar sobre anéis, e a exemplo do que foi feito ao enunciar as propriedades distributivas, são utilizadas as convenções usuais sobre precedência de operações envolvidas por parênteses. Assim, $a + b \cdot c$ é interpretado como $a + (b \cdot c)$.
- Há textos que definem anéis sem incluir o elemento identidade 1. Nestes textos, a definição acima dá nome ao que chamam de *anéis com identidade*, ou *anéis com 1*. Nesse curso, não usaremos essa convenção, de modo que **todos nossos anéis possuem identidade**. De modo similar, alguns textos definem anéis como sendo comutativos. Também não adotaremos essa convenção. **Os nossos anéis podem ser não comutativos**.
- A definição de anel não exige que $0 = 1$.
- 0 é chamado de elemento nulo, e 1 de elemento identidade.

PROPOSIÇÃO 3.2 (Propriedade multiplicativa do 0). Seja A um anel. Então $\forall a \in A$ $0 \cdot a = a \cdot 0 = 0$.

DEMONSTRAÇÃO. Provaremos a primeira afirmação. A segunda é análoga e fica como exercício.

Temos que $0 \cdot a = (0 + 0) \cdot a = 0 \cdot a + 0 \cdot a$. Cancelando, segue que $0 = 0 \cdot a$. \square

PROPOSIÇÃO 3.3 (Anel trivial). Seja $A = x$ um conjunto qualquer. Defina $x \cdot x = x = x + x = 0 = 1$. Então $(A, +, \cdot, 0, 1)$ é um anel. Um anel dessa forma é chamado de *anel trivial*.

Além disso, se A é um anel tal que $0 = 1$, então A é um anel trivial.

DEMONSTRAÇÃO. A primeira afirmação (de que A como acima é um anel) fica como exercício.

Para a segunda afirmação, assumamos que A é um anel tal que $0 = 1$. Fixe $a \in A$ qualquer. Então $a = a \cdot 1 = a \cdot 0 = 0$, ou seja, $a = 0$. Assim, A é o conjunto unitário $\{0\}$, que é um anel trivial. \square

PROPOSIÇÃO 3.4 (Regras de sinal II). Seja A um anel e $a, b \in A$. Então:

- $(-a)b = a(-b) = -(ab)$
- $(-a)(-b) = ab$.
- $(-1)a = -a$.

DEMONSTRAÇÃO. a): Temos que $ab + (-a)b = (-a)b + ab = [-a + a]b = 0b = 0$. Assim, $(-a)b = -(ab)$. Analogamente, $a(-b) = -(ab)$. b): Temos que $(-a)(-b) = -[a(-b)] = -[-(ab)] = ab$ pela regra anterior. c): Temos que $(-1)a = -(1a) = -a$. \square

3.1. Elementos invertíveis.

DEFINIÇÃO 3.5 (Elemento invertível). Seja A um anel. Um elemento $a \in A$ é dito *invertível*, ou uma *unidade* se $\exists b \in A$ tal que $a \cdot b = b \cdot a = 1$.

O conjunto de todas das unidades de A é denotado por A^* .

DEFINIÇÃO 3.6. Seja A um anel. Então, se $a \in A^*$, existe um **único** $b \in A$ tal que $a \cdot b = b \cdot a = 1$. Este elemento é denotado por a^{-1} , e é chamado de *inverso* de a .

Observação: para que a definição acima faça sentido, é necessário mostrar que se a é unidade, existe um **único** $b \in A$ tal que $a \cdot b = b \cdot a = 1$. A existência é garantida pela definição de unidade, e a demonstração da unicidade é análoga à da unicidade do inverso em grupos (Proposição 2.3), ficando como exercício.

PROPOSIÇÃO 3.7. Seja A um anel. Para todos $a, b \in A^*$, temos:

- a) $ab \in A^U$ e $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$.
- b) $a^{-1} \in A^U$ e $(a^{-1})^{-1} = a$.
- c) $1^{-1} = 1$.

Além disso, A^* é, com a restrição da operação de multiplicação do anel, um grupo com identidade 1. Caso A seja abeliano, A^* é um grupo abeliano.

DEMONSTRAÇÃO. a): Sejam $a, b \in A^*$. Pela associatividade, $(ab)(b^{-1}a^{-1}) = 1 = (b^{-1}a^{-1})(ab)$, logo, pela unicidade do inverso, $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$.

b): Seja $a \in A^*$. Temos que $a^{-1}a = 1 = a(a^{-1})$, logo, pela unicidade do inverso, $(a^{-1})^{-1} = a$.

c): Note que $1 \cdot 1 = 1 = 1 \cdot 1$, logo, pela unicidade do inverso, $1^{-1} = 1$.

A última afirmação é imediata e fica como exercício. \square

DEFINIÇÃO 3.8. Um anel de divisão é um anel não trivial para o qual todo elemento não nulo é invertível. Um corpo é um anel de divisão comutativo.

EXERCÍCIO 3.9. Mostre que um anel A é um anel de divisão se, e somente se $A^* = A \setminus \{0\}$.

DEFINIÇÃO 3.10. Um domínio de integridade é um anel comutativo não trivial A tal que $\forall a, b \in A$, se $ab = 0$, então $a = 0$ ou $b = 0$.

PROPOSIÇÃO 3.11. Seja K um corpo. Então K é um domínio de integridade.

DEMONSTRAÇÃO. Sabemos que K é um anel comutativo não trivial. Sejam $a, b \in K$ tais que $ab = 0$. Se $a = 0$, então segue a tese. Caso contrário, como K é um corpo, a^{-1} existe. Assim, temos que $b = (a^{-1}a)b = a^{-1}(ab) = 0$, logo, $b = 0$. \square

3.2. Ideais.

DEFINIÇÃO 3.12 (Ideal à esquerda). Seja A um anel. Um subconjunto $I \subseteq A$ é dito *ideal à esquerda* se:

- $0 \in I$.
- Para todos $a, b \in I$, temos $a + b \in I$.
- $\forall a \in A$ e $\forall b \in I$, temos $ab \in I$.

DEFINIÇÃO 3.13 (Ideal à direita). Seja A um anel. Um subconjunto $I \subseteq A$ é dito *ideal à direita* se:

- $0 \in I$.
- Para todos $a, b \in I$, temos $a + b \in I$.
- $\forall a \in I$ e $\forall b \in A$, temos $ab \in I$.

DEFINIÇÃO 3.14 (Ideal). Seja A um anel. Um subconjunto $I \subseteq A$ é dito *ideal* se for um ideal à esquerda e um ideal à direita. Ou seja, I é um ideal se:

- $0 \in I$.
- Para todos $a, b \in I$, temos $a + b \in I$.
- $\forall a \in A$ e $\forall b \in I$, temos $ab \in I$.
- $\forall a \in I$ e $\forall b \in A$, temos $ab \in I$.

PROPOSIÇÃO 3.15 (Ideal trivial). Seja A um anel. Então $\{0\}$ e A são ideais de A . Estes ideais são chamados de *ideais principais*

DEMONSTRAÇÃO. Exercício. □

Note que se A é um anel comutativo, então I é um ideal à esquerda se, e somente se, I é um ideal à direita. Assim, em anéis comutativos, a noção de ideal é equivalente à de ideal à esquerda ou à de ideal à direita.

PROPOSIÇÃO 3.16 (Interseção de ideais). Seja A um anel e \mathcal{F} uma coleção não vazia de ideais à esquerda de A . Então $\bigcap_{I \in \mathcal{F}} I = \bigcap \mathcal{F}$ é um ideal de A . O mesmo vale para ideais à direita e ideais.

DEMONSTRAÇÃO. Provaremos para ideais à esquerda. A prova para ideais à direita é análoga e fica como exercício.

Seja $I = \bigcap \mathcal{F}$. Então $0 \in I$, pois $0 \in I$ para todo $I \in \mathcal{F}$.

Sejam $a, b \in I$. Então, para todo $I \in \mathcal{F}$, temos que $a, b \in I$, logo, $a + b \in I$. Assim, $a + b \in \bigcap \mathcal{F}$.

Finalmente, seja $a \in A$ e $b \in I$. Então, para todo $I \in \mathcal{F}$, temos que $b \in I$, logo, $ab \in I$. Assim, $ab \in \bigcap \mathcal{F}$. □

PROPOSIÇÃO 3.17 (Ideal gerado). Seja A um anel comutativo e $B \subseteq A$ um conjunto não vazio. Então, o conjunto $I = \{a_1b_1 + \dots + a_nb_n : n \geq 1, a_i \in A, b_i \in B\}$ é o menor ideal à esquerda A que contém B (ou seja, além de ser um ideal contendo B , se J é qualquer ideal contendo B , então $I \subseteq J$). O ideal I é chamado de *ideal gerado por B* , e denotado por $\langle B \rangle$.

Se $B = \{x_0, \dots, x_n\}$, então abreviamos $\langle B \rangle$ como $\langle x_0, \dots, x_n \rangle$.

DEMONSTRAÇÃO. Primeiro, verificaremos que I é um ideal.

$0 \in I$, pois $0 = 0b$ para todo $b \in B$.

Sejam $x, y \in I$. Então existem $n, m \geq 1$, $a_1, \dots, a_n \in A$, $b_1, \dots, b_n \in B$, $c_1, \dots, c_m \in A$ e $d_1, \dots, d_m \in B$ tais que $x = a_1b_1 + \dots + a_nb_n$ e $y = c_1d_1 + \dots + c_md_m$. Assim, $x + y = (a_1b_1 + \dots + a_nb_n) + (c_1d_1 + \dots + c_md_m) = (a_1b_1 + \dots + a_nb_n) + (c_1d_1 + \dots + c_md_m) \in I$.

Finalmente, seja $a \in A$ e $b \in I$. Então existem $n \geq 1$, $a_1, \dots, a_n \in A$ e $b_1, \dots, b_n \in B$ tais que $b = a_1b_1 + \dots + a_nb_n$. Assim, $ab = (a_1b_1 + \dots + a_nb_n)a = a_1(b_1a) + \dots + a_n(b_na) \in I$.

Agora, seja J um ideal de A que contém B . Então, como J é um ideal de A , temos que $\forall a_i \in A$, $\forall b_i \in B$, temos que $(a_ib_i) \in J$. Logo, $I \subseteq J$. Portanto, I é o menor ideal de A que contém B . □

Observação: note que o menor ideal contendo $B = \emptyset$ é o ideal nulo, $\{0\}$.

PROPOSIÇÃO 3.18 (Ideal principal). Seja A um anel. Para todo $x \in A$, o conjunto $xA = \{xa : a \in A\}$ é um ideal à direita de A . O ideal xA é chamado de *ideal principal à direita gerado por x* . Analogamente, o conjunto $Ax = \{ax : a \in A\}$ é um ideal à esquerda de A , e é chamado

de *ideal principal à esquerda gerado por x* . Se A é comutativo, o ideal $xA = Ax$ é chamado de *ideal principal gerado por x* .

DEMONSTRAÇÃO. Mostraremos que xA é um ideal à direita. As demais afirmações ficam como exercício.

Note que $0 \in xA$, pois $x0 = 0$.

Sejam $a, b \in xA$. Então, existem $a_1, a_2 \in A$ tais que $a = xa_1$ e $b = xa_2$. Assim, $a + b = xa_1 + xa_2 = x(a_1 + a_2) \in xA$.

Finalmente, seja $a \in A$ e $b \in xA$. Então, existe $b_1 \in A$ tal que $b = xb_1$. Assim, $ab = (xa)b_1 = x(ab_1) \in xA$. \square

DEFINIÇÃO 3.19 (Ideal principal). Seja A um anel. Para todo $x \in A$, o conjunto $xA = \{xa : a \in A\}$ é um ideal à esquerda de A . O ideal xA é chamado de *ideal principal à esquerda gerado por x* . Analogamente, o conjunto $Ax = \{ax : a \in A\}$ é um ideal à direita de A , e é chamado de *ideal principal à direita gerado por x* . Se A é comutativo, o ideal $xA = Ax$ é chamado de *ideal principal gerado por x* .

Observação: note que, comparando as definições, se A é um anel comutativo com unidade, $xA = \langle x \rangle$.

Notemos que ideais triviais são principais à esquerda e à direita, pois $0A = \{0\} = A0$ e $A1 = A = 1A$.

DEFINIÇÃO 3.20 (Domínio de ideais principais). Um domínio de ideais principais (DIP), ou anel principal, é um domínio de integridade A tal que todo ideal de A é principal.

PROPOSIÇÃO 3.21 (Ideais de um corpo são triviais). Todo ideal de um corpo é trivial. Em particular, todo corpo é um DIP. Reciprocamente, se A é um anel comutativo não trivial cujo todo ideal é trivial, então A é um corpo.

DEMONSTRAÇÃO. Seja K um corpo e I um ideal de K . Se $I = \{0\}$, então I é trivial. Se $I \neq \{0\}$, então existe $a \in I$ tal que $a \neq 0$. Daí $1 = a^{-1}a \in I$. Logo, para todo $k \in K$, $k = 1k \in I$.

Para a recíproca, seja A um anel comutativo não trivial tal que todo ideal de A é trivial, e fixe $x \in A \setminus \{0\}$. Como Ax é um ideal trivial e $0 \neq x \in Ax$, temos que $Ax = A$. Logo, existe $a \in A$ tal que $ax = 1$. Assim, x é invertível. Portanto, A é um corpo. \square

PROPOSIÇÃO 3.22 (\mathbb{Z} é um DIP que não é um corpo). Seja I um ideal de \mathbb{Z} . Veremos que I é um ideal principal. Se $I = \{0\}$, então I é principal. Caso contrário, I contém ao menos um elemento positivo, já que, sendo $x \in I \setminus \{0\}$, temos que $-x \in I$ e um dos $x, -x$ é positivo.

Seja n o menor inteiro positivo de I . Afirmamos que $I = n\mathbb{Z}$. De fato, se $x \in I$, então escreva $x = qn + r$, onde $q, r \in \mathbb{Z}$ e $0 \leq r < n$. Como $x \in I$, temos que $r = x - qn \in I$. Assim, $r = 0$, ou violaríamos a minimalidade de n . Logo, $x = qn \in n\mathbb{Z}$. Portanto, $I \subseteq n\mathbb{Z}$. Como $n\mathbb{Z} = \langle n \rangle$ e $n \in I$, temos que $n\mathbb{Z} \subseteq I$, o que completa a prova.

4. Subanéis

DEFINIÇÃO 4.1 (Subanel). Seja A um anel. Um subanel de A é um conjunto $B \subseteq A$, com as operações de A restritas à B e com mesmo 0 e 1 de A , é um anel. Note que, para isso, é necessário e suficiente que:

- $1 \in B$
- $a - b \in B$ para todo $a, b \in B$.
- $ab \in B$ para todo $a, b \in B$.

5. Quocientes e homomorfismos

5.1. Homomorfismos.

DEFINIÇÃO 5.1. Sejam A, R anéis. Uma função $f : A \rightarrow R$ é um *homomorfismo* se:

- $f(a + b) = f(a) + f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(-a) = -f(a)$ para todo $a \in A$.
- $f(0_A) = 0_R$
- $f(ab) = f(a)f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(1_A) = 1_R$.

PROPOSIÇÃO 5.2 (Propriedades de homomorfismos). Seja $f : A \rightarrow R$ um homomorfismo de anéis. Então:

- a) Para todo $a \in A^*$, temos $f(a) \in R^*$ e $f(a^{-1}) = f(a)^{-1}$.
- b) $\ker f$

6. Quocientes e homomorfismos

6.1. homomorfismos.

DEFINIÇÃO 6.1. Sejam A, R anéis. Uma função $f : A \rightarrow R$ é um *homomorfismo* se:

- $f(a + b) = f(a) + f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(-a) = -f(a)$ para todo $a \in A$.
- $f(0_A) = 0_R$
- $f(ab) = f(a)f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(1_A) = 1_R$.

Caso f seja injetora, dizemos que f é um *monomorfismo*. Caso f seja sobrejetora, dizemos que f é um *epimorfismo*. Caso f seja bijetora, dizemos que f é um *isomorfismo*.

PROPOSIÇÃO 6.2 (Propriedades de homomorfismos). Seja $f : A \rightarrow R$ um homomorfismo de anéis. Então:

- a) Para todo $a \in A^*$, temos $f(a) \in R^*$ e $f(a^{-1}) = f(a)^{-1}$.
- b) O núcleo de f , definido como $\ker f = f^{-1}(\{0_R\}) = \{a \in A : f(a) = 0_R\}$, é um ideal de A .
- c) A imagem de f , $\text{ran } f = \{f(a) : a \in A\}$, é um subanel de R . Se A é comutativo, $\text{ran } f$ também é.
- d) Se f é injetora se, e somente se $\ker f = \{0_A\}$.

DEMONSTRAÇÃO. a) Se $a \in A^*$, então $f(a)f(a^{-1}) = f(aa^{-1}) = f(1_A) = 1_R$ e $f(a^{-1})f(a) = f(aa^{-1}) = f(1_A) = 1_R$. Assim, $f(a^{-1}) = f(a)^{-1}$ e $f(a) \in R^*$.

b) Temos que $0_A \in \ker f$, pois $f(0_A) = 0_R$. Sejam $a, b \in \ker f$. Então $f(a) = f(b) = 0_R$, logo, $f(a + b) = f(a) + f(b) = 0_R + 0_R = 0_R$. Assim, $a + b \in \ker f$.

Se $a \in \ker f$ e $x \in A$, vejamos que $ax, xa \in \ker f$: $f(ax) = f(a)f(x) = 0_R f(x) = 0_R$ e $f(xa) = f(x)f(a) = f(x)0_R = 0_R$. Assim, $ax, xa \in \ker f$.

Portanto, $\ker f$ é um ideal de A .

c) Seja $a, b \in \text{ran } f$. Então existem $x, y \in A$ tais que $a = f(x)$ e $b = f(y)$. Assim, $a - b = f(x) - f(y) = f(x - y)$. Logo, $a - b \in \text{ran } f$. Similarmente, $ab = f(x)f(y) = f(xy) \in \text{ran } f$, e $1_R = f(1_A) \in \text{ran } f$.

Portanto, $\text{ran } f$ é um subanel de R . Se A é comutativo, $\text{ran}(f)$ também é comutativo, pois dados $a, b \in \text{ran } f$, existem $x, y \in A$ tais que $a = f(x)$ e $b = f(y)$. Assim, $ab = f(x)f(y) = f(xy) = f(yx) = f(y)f(x) = ba$.

d) Se f é injetora, então $f(a) = 0_R = f(0_A)$ implica que $a = 0_A$, logo, $\ker f = \{0_A\}$. Reciprocamente, se $\ker f = \{0_A\}$, então $f(a) = f(b)$ implica que $f(a - b) = 0_R$, logo, $a - b = 0_A$, ou seja, $a = b$. Assim, f é injetora. \square

PROPOSIÇÃO 6.3 (Critério de homomorfismo). Seja $f : A \rightarrow R$ um homomorfismo de anéis. Então, f é um homomorfismo se, e somente se:

- $f(a + b) = f(a) + f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(ab) = f(a)f(b)$ para todo $a, b \in A$.
- $f(1_A) = 1_R$.

DEMONSTRAÇÃO. Se f é um homomorfismo, então as duas propriedades acima são satisfeitas. Reciprocamente, se as duas propriedades acima são satisfeitas, então:

- $f(0_A) = f(0_A + 0_A) = f(0_A) + f(0_A)$. Cancelando, temos $0_R = f(0_A)$.
- $f(-a) + f(a) = f(0_A) = 0_R$, logo, $f(-a) = -f(a)$.

$f(0_A) = f(0_A + 0_A) = f(0_A) + f(0_A) = 0_R$, e $f(-a) = f(0_A - a) = f(0_A) + f(-a) = 0_R - f(a) = -f(a)$ para todo $a \in A$. Assim, f é um homomorfismo. \square

6.2. Quocientes.

DEFINIÇÃO 6.4. Seja A um anel. Uma relação de congruência em A é uma relação de equivalência \sim em A que “preserva operações”. Explicitamente, tal que para todos $a, b, c, d \in A$, se $a \sim b$ e $c \sim d$, então $a + c \sim b + d$ e $ac \sim bd$.

Quais são todas as relações de congruência em A ? A proposição abaixo classifica-as a partir dos ideais de A .

PROPOSIÇÃO 6.5 (Relações de congruência vs ideais). Seja A um anel, $\mathcal{R}(A)$ o conjunto de todas as relações de congruência em A e $\mathcal{I}(A)$ o conjunto de todos os ideais de A . Então, existe uma bijeção entre $\mathcal{R}(A)$ e $\mathcal{I}(A)$ dada por $\sim \mapsto I_\sim = \{a \in A : a \sim 0\}$, cuja inversa se dá por $I \mapsto \sim_I = \{(a, b) \in A^2 : a - b \in I\}$.

DEMONSTRAÇÃO. Primeiro, vejamos que se \sim é uma relação de congruência, então I_\sim é um ideal de A .

- $0 \in I_\sim$, pois $0 \sim 0$.
- Se $a, b \in I_\sim$, então $a \sim 0$ e $b \sim 0$, logo $a + b \sim 0 + 0 = 0$, portanto, $a + b \in I_\sim$.
- Se $x \in A$ e $a \in I_\sim$, então $a \sim 0$ e $x \sim 0$, logo $ax \sim a0 = 0$ e $xa \sim 0a = 0$, portanto, $ax, xa \in I_\sim$.

Agora, vejamos que se I é um ideal, então \sim_I é uma relação de congruência. De fato, temos que, para todos $a, b, c, d \in A$:

- $a \sim_I a$ pois $a - a = 0 \in I$.
- Se $a \sim_I b$, então $a - b \in I$, logo $(-1)(a - b) = b - a \in I$, e, portanto, $b \sim_I a$.
- Se $a \sim_I b$ e $b \sim_I c$, então $a - b \in I$ e $b - c \in I$, logo, $(a - b) + (b - c) = a - c \in I$, portanto, $a \sim_I c$.
- Se $a \sim_I b$ e $c \sim_I d$, então $a - b \in I$ e $c - d \in I$, logo, $(a - b) + (c - d) = (a + c) - (b + d) \in I$, portanto, $a + c \sim_I b + d$.
- Se $a \sim_I b$ e $c \sim_I d$, então $a - b \in I$ e $c - d \in I$, logo, $(a - b)c = ac - bc \in I$ e $b(c - d) = bc - bd \in I$, logo $(ac - bc) + (bc - bd) = ac - bd \in I$, portanto, $ac \sim_I bd$.

Se I é ideal, $I_{\sim_I} = I$, pois, para todo $a \in A$:

$$a \in I_{\sim_I} \Leftrightarrow a \sim_I 0 \Leftrightarrow a - 0 \in I \Leftrightarrow a \in I.$$

Finalmente, se \sim é relação de congruência, $\sim_{I_\sim} = \sim$, pois, para todos $a, b \in A$:

$$a \sim_{I_\sim} b \Leftrightarrow a - b \in I_\sim \Leftrightarrow a - b \sim 0 \Leftrightarrow a \sim b.$$

Justificando a última equivalência: se $a - b \sim 0$, como $b \sim b$, temos que $a - b + b \sim b$, ou seja, que $a \sim b$. Reciprocamente, se $a \sim b$, como $(-b) \sim (-b)$, segue que $a + (-b) \sim b + (-b)$, ou seja, que $a - b \sim 0$. \square

Como feito nos inteiros, podemos, ao invés de trabalhar com relações de congruência, encontrar anéis em que a congruência corresponda exatamente à igualdade.

DEFINIÇÃO 6.6. Seja A um anel e \sim uma relação de congruência. Define-se que A/\sim é $A/\sim = \{[a]_\sim : a \in A\}$, onde $[a]_\sim = \{b \in A : b \sim a\}$ é a classe de equivalência de a com relação a \sim .

Define-se que $[a]_\sim + [b]_\sim = [a + b]_\sim$ e que $[a]_\sim [b]_\sim = [ab]_\sim$.

Se I é um ideal, $A/I = A/\sim_I$, e o mapa quociente de A em A/I se dá por $q : A \rightarrow A/I$ dada por $q(a) = [a]_{\sim_I}$.

Pelas propriedades das relações de congruência, a soma e produto de A/\sim (ou A/I) estão bem definidas. Além disso:

LEMA 6.7 (Propriedades do quociente). Na notação acima:

- a) q é epimorfismo de anéis.
- b) $\ker q = I$.
- c) $q(a) = a + I = \{a + x : x \in I\}$ para todo $a \in A$.
- d) Se A é anel comutativo, A/I também é.

DEMONSTRAÇÃO. a) Seja $a, b, c, d \in A$. Temos que $q(a + b) = q(a) + q(b)$ e $q(ab) = q(a)q(b)$ por definição da soma em A/I , e q é sobrejetora pela definição de q . Finalmente, $q(1_A)$ é identidade pois para todo $a \in A$, $q(1_A)q(a) = q(1_A a) = q(a)$ e $q(a)q(1_A) = q(a 1_A) = q(a)$, logo, $q(1_A) = 1_{A/I}$.

b) Temos que $\ker q = \{a \in A : q(a) = q(0)\} = \{a \in A : a \sim_I 0\} = \{a \in A : a \in I\} = I$.

c) Temos que $q(a) = [a]_{\sim_I} = \{b \in A : b \sim_I a\} = \{b \in A : b - a \in I\} = \{a + x : x \in I\}$ pois se $b - a \in I$ se, e somente se $a - b = x$ para algum $x \in I$.

d) Se A é comutativo, então $A/I = \text{ran } q$ também é, pois q é homomorfismo de anéis. \square

6.3. Teoremas do isomorfismo.

TEOREMA 6.8 (Teorema do homomorfismo). Seja $f : A \rightarrow R$ um homomorfismo de anéis e J um ideal tal que $J \subseteq \ker f$. Então, existe um único homomorfismo de anéis $g : A/J \rightarrow R$ tal que $g \circ q = f$, onde $q : A \rightarrow A/J$ é o mapa quociente canônico dado por $q(a) = a + J$.

DEMONSTRAÇÃO. Definimos $g : A/J \rightarrow R$ por $g(a + J) = f(a)$. Então, g é bem definido, pois se $a + J = b + J$, então $a - b \in J \subseteq \ker f$, logo, $f(a - b) = 0_R$, ou seja, $f(a) = f(b)$.

Agora, vejamos que g é um homomorfismo de anéis. De fato, para todo $a', b' \in A/J$, sendo $a' = a + J$ e $b' = b + J$, temos que:

- $g(a' + b') = g((a + J) + (b + J)) = g((a + b) + J) = f(a + b) = f(a) + f(b) = g(a + J) + g(b + J)$.
- $g(a'b') = g((a + J)(b + J)) = g(ab + J) = f(ab) = f(a)f(b) = g(a + J)g(b + J)$.
- $g(1_{A/J}) = g(1_A + J) = f(1_A) = 1_R$.

\square

TEOREMA 6.9 (Primeiro Teorema do Isomorfismo). Seja $f : A \rightarrow R$ um homomorfismo de anéis. Então, existe um único homomorfismo de anéis $g : A/\ker f \rightarrow R$ tal que $g \circ q = f$, onde $q : A \rightarrow A/\ker f$ é o mapa quociente canônico dado por $q(a) = a + \ker f$, e $g : A/\ker f \rightarrow \text{ran } f$ é isomorfismo.

DEMONSTRAÇÃO. Pelo Teorema do homomorfismo com $J = \ker f$, existe um único homomorfismo de anéis $g : A/\ker f \rightarrow \operatorname{ran} f$ tal que $g \circ q = f$. Como $g \circ q = f$ e q é sobrejetora, então $\operatorname{ran} g = \operatorname{ran}(g \circ q) = \operatorname{ran} f$, logo, g é sobre $\operatorname{ran} f$.

Resta ver que g é injetora. De fato, seja $q(a) \in A/\ker f$ tal que $g(q(a)) = 0_R$. Então, $f(a) = 0_R$, logo, $a \in \ker f = J$. ou seja, $a \sim_I 0$, logo $q(a) = q(0) = 0_{A/\ker f}$. Assim, g é injetora. \square

7. Produtos de anéis

DEFINIÇÃO 7.1 (Produtos de anéis). Seja $(R_i)_{i \in I}$ uma família de anéis, onde cada R_i tem as operações $+_i, \cdot_i$ e constantes $0_i, 1_i$.

O produto (direto) de $(R_i)_{i \in I}$ é o conjunto $\prod_{i \in I} R_i$ munido das operações “ponto à ponto”: dados $a = (a_i : i \in I), b = (b_i : i \in I)$ em $\prod_{i \in I} R_i$:

$$a + b = (a_i : i \in I) + (b_i : i \in I) = (a_i +_i b_i : i \in I) = (a_i +_i b_i)_{i \in I}$$

$$a \cdot b = (a_i : i \in I) \cdot (b_i : i \in I) = (a_i \cdot_i b_i : i \in I) = (a_i \cdot_i b_i)_{i \in I}$$

LEMA 7.2 (O produto de anéis está bem definido). Seja $(R_i)_{i \in I}$ uma família de anéis. Então seu produto direto $\prod_{i \in I} R_i$ é um anel com $0 = (0_i : i \in I)$ e $1 = (1_i : i \in I)$.

DEMONSTRAÇÃO. Sejam $a = (a_i : i \in I), b = (b_i : i \in I)$ e $c = (c_i : i \in I)$ em $\prod_{i \in I} R_i$.

- **Associatividade da soma:** $(a + b) + c = (a_i +_i b_i)_{i \in I} + c = ((a_i +_i b_i) +_i c_i)_{i \in I} = (a_i +_i (b_i +_i c_i))_{i \in I} = a + (b + c)$
- **Associatividade do produto:** Análogo.
- **Comutatividade da soma:** $a + b = (a_i +_i b_i)_{i \in I} = (b_i +_i a_i)_{i \in I} = b + a$
- **Neutro da soma:** $a + 0 = (a_i +_i 0_i)_{i \in I} = (a_i)_{i \in I} = a$
- **Inverso da soma:** Dado $a = (a_i)_{i \in I}$, considere $-a = (-a_i)_{i \in I}$. Então $a + (-a) = (a_i +_i (-a_i))_{i \in I} = (0_i)_{i \in I} = 0$.
- **Distributividade:** $a \cdot (b + c) = (a_i \cdot_i (b_i +_i c_i))_{i \in I} = (a_i \cdot_i b_i +_i a_i \cdot_i c_i)_{i \in I} = a \cdot b + a \cdot c$.
- **Distributividade II:** $(a + b) \cdot c = ((a_i +_i b_i) \cdot_i c_i)_{i \in I} = (a_i \cdot_i c_i +_i b_i \cdot_i c_i)_{i \in I} = a \cdot c + b \cdot c$.
- **Neutro do produto:** $a \cdot 1 = (a_i \cdot_i 1_i)_{i \in I} = (a_i)_{i \in I} = a$ e $1 \cdot a = (1_i \cdot_i a_i)_{i \in I} = (a_i)_{i \in I} = a$.

□

DEFINIÇÃO 7.3 (Os mapas de projeção). Seja $(R_i)_{i \in I}$ uma família de anéis e seja $R = \prod_{i \in I} R_i$. Para cada $i \in I$, o mapa de projeção $\pi_i : R \rightarrow R_i$ é dado por $\pi_i(a) = a_i$.

Escrevendo de outra forma, $\pi_i((a_j : j \in I)) = a_i$.

LEMA 7.4 (Os mapas de projeção são homomorfismos). Seja $(R_i)_{i \in I}$ uma família de anéis e seja $R = \prod_{i \in I} R_i$. Para cada $i \in I$, o mapa de projeção $\pi_i : R \rightarrow R_i$ é um homomorfismo de anéis.

DEMONSTRAÇÃO. Sejam $a = (a_j : j \in I), b = (b_j : j \in I)$ em R . Então:

- $\pi_i(a + b) = \pi_i((a_j + b_j)_{j \in I}) = a_i + b_i = \pi_i(a) + \pi_i(b)$
- $\pi_i(a \cdot b) = \pi_i((a_j \cdot b_j)_{j \in I}) = a_i \cdot b_i = \pi_i(a) \cdot \pi_i(b)$
- $\pi_i(1_R) = \pi_i((1_j)_{j \in I}) = 1_i$

□

Notação: se R, S são anéis, o produto direto de (R, S) é denotado também como $R \times S$. Assim, se $(r, s), (r', s') \in R \times S$ e

7.1. A propriedade universal do produto direto de anéis.

TEOREMA 7.5 (Propriedade universal do produto direto de anéis). Seja $(R_i)_{i \in I}$ uma família de anéis e seja $R = \prod_{i \in I} R_i$ seu produto direto. Então, para cada anel S e cada família de homomorfismos de anéis $f_i : R_i \rightarrow S$, existe um único homomorfismo de anéis $f : R \rightarrow S$ tal que $\pi_i \circ f = f_i$ para todo $i \in I$.

$$\begin{array}{ccc}
 & S & \\
 f_i \swarrow & & \downarrow \exists! f \\
 R_i & \xleftarrow{\pi_i} & R
 \end{array}$$

Além disso, se R' e $(p_i : R' \rightarrow R)_{i \in I}$ é um anel e uma família de homomorfismos de anéis, respectivamente, tal que para cada anel S e cada família de homomorfismos de anéis $f_i : R_i \rightarrow S$, existe um único homomorfismo de anéis $f : R' \rightarrow S$ tal que $p_i \circ f = f_i$ para todo $i \in I$, então existe um único isomorfismo de anéis $\phi : R \rightarrow R'$ tal que $p_i \circ \phi = \pi_i$ para todo $i \in I$.

DEMONSTRAÇÃO. Seja $R = \prod_{i \in I} R_i$ e seja S um anel comutativo. Para cada $i \in I$, considere $f_i : S \rightarrow R_i$ um homomorfismo de anéis. Defina $f : S \rightarrow R$ tal que, dado $s \in S$:

$$f(s) = (f_i(s))_{i \in I}.$$

Então, para cada $i \in I$, $\pi_i \circ f(s) = \pi_i(f_j(s) : j \in I) = f_i(s)$, ou seja, $\pi_i \circ f = f_i$. Vejamos que f é homomorfismo de anéis. Dados $s, t \in S$, temos:

- $f(s + t) = (f_i(s + t))_{i \in I} = (f_i(s) + f_i(t))_{i \in I} = (f_i(s))_{i \in I} + (f_i(t))_{i \in I} = f(s) + f(t)$.
- $f(s \cdot t) = (f_i(s \cdot t))_{i \in I} = (f_i(s) \cdot f_i(t))_{i \in I} = (f_i(s))_{i \in I} \cdot (f_i(t))_{i \in I} = f(s) \cdot f(t)$.
- $f(1_S) = (f_i(1_S))_{i \in I} = (1_i)_{i \in I} = 1_R$.

Vejamos que f é único. Se $g : R \rightarrow S$ é um homomorfismo de anéis tal que $\pi_i \circ g = f_i$, então, para cada $s \in S$, temos, que, para cada $i \in I$:

$$\pi_i(g(s)) = f_i(s).$$

Assim:

$$g(s) = (\pi_i(g(s)) : i \in I) = (f_i(s) : i \in I) = f(s).$$

Portanto, $g = f$.

Agora suponha que R' e $(p_i : R' \rightarrow R)_{i \in I}$ são como no enunciado.

Aplicando a propriedade de R' para $(\pi_i : i \in I)$, existe um homomorfismo de anéis $\phi : R' \rightarrow R$ tal que $p_i \circ \phi = \pi_i$ para todo $i \in I$.

$$\begin{array}{ccc}
 & R & \\
 \pi_i \swarrow & & \downarrow \exists! \phi \\
 R_i & \xleftarrow{p_i} & R'
 \end{array}$$

Nosso objetivo é mostrar que ϕ é isomorfismo. Construiremos uma inversa.

Aplicando a propriedade de R para $(\pi_i : i \in I)$, existe um homomorfismo de anéis $\psi : R' \rightarrow R$ tal que $\pi_i \circ \psi = p_i$ para todo $i \in I$.

$$\begin{array}{ccc}
 & R' & \\
 p_i \swarrow & \downarrow \exists! \psi & \\
 R_i & \xleftarrow{\pi_i} & R
 \end{array}$$

Tanto os mapas $\phi \circ \psi$ quanto a identidade $\text{id}_{R'} : R' \rightarrow R'$ são homomorfismos de anéis que satisfazem o seguinte diagrama:

$$\begin{array}{ccc}
 & R' & \\
 p_i \swarrow & \downarrow \phi \circ \psi, \text{id}_{R'} & \\
 R_i & \xleftarrow{p_i} & R'
 \end{array}$$

Pois $p_i \circ \text{id}_{R'} = p_i$ e $p_i \circ \phi \circ \psi = \pi_i \circ \psi = p_i$. Assim, pela unicidade do homomorfismo de anéis, $\phi \circ \psi = \text{id}_{R'}$.

Analogamente, tanto os mapas $\psi \circ \phi$ quanto a identidade $\text{id}_R : R \rightarrow R$ são homomorfismos de anéis que satisfazem o seguinte diagrama:

$$\begin{array}{ccc}
 & R & \\
 \pi_i \swarrow & \downarrow \psi \circ \phi, \text{id}_R & \\
 R_i & \xleftarrow{\pi_i} & R
 \end{array}$$

Pois $\pi_i \circ \text{id}_R = \pi_i$ e $\pi_i \circ \psi \circ \phi = p_i \circ \phi = \pi_i$. Assim, pela unicidade do homomorfismo de anéis, $\psi \circ \phi = \text{id}_R$. Assim, ψ e ϕ são isomorfismos inversos.

A unicidade de ϕ como isomorfismo vem de sua unicidade como homomorfismo. \square

8. Polinômios

8.1. Séries Formais. Se R é um anel comutativo, intuitivamente uma série formal é um objeto que se escreve na forma:

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots = \sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i$$

onde $a_i \in R$.

Que propriedades gostaríamos que esse objeto tivesse?

- **Igualdade:** igualdade de objetos desse tipo fosse determinada por uma condição de igualdade entre os coeficientes. Ou seja, que:

$$\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i = \sum_{i=0}^{\infty} b_i x^i \Leftrightarrow \forall i \in \mathbb{N} \, a_i = b_i.$$

- **Soma:** que a soma de dois objetos desse tipo fosse dada por:

$$\left(\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i \right) + \left(\sum_{i=0}^{\infty} b_i x^i \right) = \left(\sum_{i=0}^{\infty} (a_i + b_i) x^i \right)$$

- **Produto:** que o produto de dois objetos desse tipo fosse dada por:

$$\left(\sum_{i=0}^{\infty} a_i x^i \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{\infty} b_i x^i \right) = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\sum_{j=0}^i a_j b_{i-j} \right) x^i$$

- **Preservação:** que as operações do anel sejam preservadas.
- Notação: $R[[x]]$ é o conjunto de todas as séries formais em R .

DEFINIÇÃO 8.1. Seja R um anel comutativo. Definiremos $R[[x]] = R^{\mathbb{N}}$.

Um elemento de $R[[x]]$ é da forma $p = (p_0, p_1, \dots) = (p_n)_{n \in \mathbb{N}} = (p(n))_{n \in \mathbb{N}} = (p(0), p(1), \dots)$ onde $p_i = p(i) \in R$ para todo $i \in \mathbb{N}$.

O suporte de $p \in R[[x]]$ é o conjunto $\text{supp}(p) = \{i \in \mathbb{N} : p_i \neq 0\}$. O grau de $p \in R[[x]]$ é o maior elemento de $\text{supp}(p)$, denotado por $\deg(p)$. Se $p = 0$, então $\deg(p) = -\infty$.

Intuição: $p = (a_0, a_1, \dots)$ corresponderá à $a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n + \dots$.

Operações: Se $p, q \in R[[x]]$, define-se:

$$p + q = (p_0 + q_0, p_1 + q_1, \dots) = (p_i + q_i)_{i \in \mathbb{N}} \in R^{\mathbb{N}}$$

$$p \cdot q = (p_0 q_0, p_1 q_0 + p_0 q_1, p_2 q_0 + p_1 q_1 + p_0 q_2, \dots) = \left(\sum_{j=0}^i p_{i-j} q_j \right)_{i \in \mathbb{N}}$$

$$1_{R[[x]]} = (1, 0, 0, \dots)$$

$$0_{R[[x]]} = (0, 0, 0, \dots)$$

LEMA 8.2 (Séries formais formam anéis). Se R é um anel comutativo, então $R[[x]]$ é um anel comutativo.

DEMONSTRAÇÃO. A operação de soma de $R[[x]]$ é a mesma de $R^{\mathbb{N}}$, que já verificamos satisfazer as propriedades de grupo Abelian. Assim, $R[[x]]$ é um grupo abeliano sob a soma.

- **Distributividade:**

$$\begin{aligned} p \cdot (q + r) &= p \cdot (q_i + r_i)_{i \in \mathbb{N}} = \left(\sum_{j=0}^i p_{i-j} (q_j + r_j) \right)_{i \in \mathbb{N}} \\ &= \left(\sum_{j=0}^i p_{i-j} q_j \right)_{i \in \mathbb{N}} + \left(\sum_{j=0}^i p_{i-j} r_j \right)_{i \in \mathbb{N}} = p \cdot q + p \cdot r. \end{aligned}$$

- **Elemento Neutro:**

$$p \cdot 1 = \left(\sum_{j=0}^i p_{i-j} \delta_{0j} \right)_{i \in \mathbb{N}} = (p_i)_{i \in \mathbb{N}}.$$

- **Comutatividade:** A i -ésima coordenada de $p \cdot q$ é $\sum_{j=0}^i p_{i-j}q_j = \sum (p_{i_j}q_j : j \in A_j)$, onde $A_j = \{0, \dots, i\}$. A função $\phi : A_j \rightarrow A_j$ dada por $\phi(j) = i - j$ é bijetora, pois é injetora e A_j é finito. Assim:

$$\sum_{j=0}^i p_{i-j}q_j = \sum_{j=0}^i p_{i-\phi(j)}q_{\phi(j)} = \sum_{j=0}^i p_jq_{i-j} = \sum_{j=0}^i q_{i-j}p_j$$

E esta é a i -ésima coordenada de $q \cdot p$.

- **Associatividade:** Temos que a i -ésima coordenada de $(p \cdot q) \cdot r$ é dada por:

$$\begin{aligned} \pi_i((p \cdot q) \cdot r) &= \sum_{j=0}^i \pi_{i-j}(p \cdot q) \cdot q_j = \sum_{j=0}^i \left(\sum_{k=0}^{i-j} p_{i-j-k}q_k \right) \cdot q_j \\ &= \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^{i-j} p_{i-j-k}q_kq_j = \sum (p_{i-j-k}q_kr_j : (j, k) \in A) \end{aligned}$$

Onde $A = \{(j, k) : 0 \leq j \leq i, 0 \leq k \leq i - j\}$.

Temos que a i -ésima coordenada de $p \cdot (q \cdot r)$ é dada por:

$$\begin{aligned} \pi_i(p \cdot (q \cdot r)) &= \sum_{s=0}^i p_{i-s}\pi_s(q \cdot r) = \sum_{s=0}^i p_{i-s} \left(\sum_{t=0}^s q_{s-t}r_t \right) \\ &= \sum_{s=0}^i \sum_{t=0}^s p_{i-s}q_{s-t}r_t = \sum (q_{i-s}q_{s-t}r_t : (s, t) \in B) \end{aligned}$$

onde $B = \{(s, t) : 0 \leq t \leq s \leq i\}$. A função $\phi : A \rightarrow B$ dada por $\phi(j, k) = (j + k, j)$ é bijetora: é em B , pois $0 \leq j \leq j + k \leq j + (i - j) = i$. É injetora, pois se $(j + k, j) = (j' + k', j')$ então $j = j'$ e, cancelando, $k = k'$. Finalmente, é sobrejetora, pois se $0 \leq t \leq s \leq i$, sendo $j = t$ e $k = s - t$, temos que $0 \leq j \leq i$, $0 \leq k = s - t \leq i - t = i - j$ e $j + k = s$. Assim, ϕ é bijetora. Portanto:

$$\begin{aligned} \sum (q_{i-s}q_{s-t}r_t : (s, t) \in B) &= \sum (q_{i-(j+k)}q_{(j+k)-j}r_j : (j, k) \in A) \\ &= \sum (q_{i-j-k}q_kr_j : (j, k) \in A). \end{aligned}$$

□

Dado $p \in \mathbb{R}_x$, utilizamos a notação

$$p = p(x) = \sum_{i=0}^{\infty} p_i x^i.$$

É importante observar que não há, de fato, uma “soma infinita” acontecendo aqui. É possível dar sentido à essa soma infinita utilizando a teoria de limites diretos de anéis, mas não faremos isso aqui. Por ora, isso é apenas uma notação especial para tratar desses objetos. Note que, ao menos por enquanto, a letra x é apenas parte da notação, e que não faz sentido, por enquanto, “substituir x ” por algo.

8.2. Anéis de Polinômios. Na subseção anterior, introduzimos o anel das séries formais de um anel comutativo dado. Vimos que tal anel é um anel comutativo.

Deste anel, podemos extrair o anel de polinômios.

DEFINIÇÃO 8.3. Seja R um anel comutativo. O anel de polinômios $R[x]$ é o subconjunto de $R[[x]]$ dado por:

$$R[x] = \{p \in R[[x]] : \deg(p) < \infty\}$$

Note que uma série formal tem grau $< \infty$ se, e somente se, todos os coeficientes, a partir de algum ponto, são nulos.

LEMA 8.4. Seja R um anel comutativo. O anel de polinômios $R[x]$ é um subanel de $R[[x]]$. Mais especificamente, dados $p(x), q(x) \in R[[x]]$, temos que, se $\text{gr}(p(x)) < \infty$ e $\text{gr}(q(x)) < \infty$, então:

- a) $\text{gr } p(x)q(x) \leq \text{gr } p(x) + \text{gr } q(x)$ caso ambos sejam não nulos, e a igualdade vale se R for um domínio de integridade.
- b) $\text{gr } p(x) + q(x) \leq \max\{\text{gr } p(x), \text{gr } q(x)\}$.

DEMONSTRAÇÃO. Para a primeira afirmação, sejam n, m os graus de $p(x)$ e $q(x)$, respectivamente.

Calculemos o coeficiente $n + m$ de $p(x)q(x)$.

$$\pi_{n+m}(p(x)q(x)) = \sum_{j=0}^{n+m} p_{n+m-j}q_j.$$

Se $0 \leq j < m$ temos que $n + m - j > 0$, e $p_{n+m-j} = 0$. Se $j > m$, temos que $q_j = 0$. Assim, o único termo não nulo da soma é quando $j = m$, e temos que $p_{n+m-m}q_m = p_nq_m$, que é não nulo se R for um domínio. Por outro lado, se $l > n + m$ temos que:

$$\pi_l(p(x)q(x)) = \sum_{j=0}^l p_{l-j}q_j.$$

Se $0 \leq j \leq m$ temos que $l - j > m + n - m = n$, e $p_{l-j} = 0$. Se $j > m$, temos que $q_j = 0$. Assim, todos os coeficientes da soma são 0.

Para a segunda afirmação, se $l > \max\{\text{gr } p(x), \text{gr } q(x)\}$, temos que o l -ésimo coeficiente de $p(x) + q(x)$ é 0, pois este é $p_l + q_l = 0 + 0$.

Agora, para a afirmação principal, as duas afirmações itemizadas nos mostram que $R[x]$ é fechado pela soma e produto de $R[[x]]$. Finalmente, note que o grau da série $1 = (1, 0, 0, \dots)$ é 0, logo, $1 \in R[x]$. \square

Agora vamos trabalhar um pouco mais nossa notação.

DEFINIÇÃO 8.5. Seja R um anel comutativo. Em $R[x]$, seja $x = (0, 1, 0, 0, \dots)$ e, para cada $r \in R$, seja $\hat{r} = (\hat{r}, 0, 0, \dots)$.

LEMA 8.6. Na notação anterior, para todo $r \in R$ e $n, i \geq 0$:

$$\pi_i(\hat{r}x^n)(i) = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq n \\ r & \text{se } i = n. \end{cases}$$

Ou seja, $\hat{r}x^n = (0, 0, \dots, r, 0, \dots)$ onde o r está na posição n .

DEMONSTRAÇÃO. Fixe r . Seguimos por indução. Para $n = 0$, temos que $\hat{r}x^0 = \hat{r} = (r, 0, 0, \dots)$ e para $n = 1$ temos que $\hat{r}x^1 = x = (0, r, 0, \dots)$.

Para o passo $n + 1$, onde $n \geq 1$, temos que, sendo $i \geq 1$:

$$\pi_i(\hat{r}x^{n+1}) = \pi_i((\hat{r}x^n) \cdot x) = \sum_{j=0}^i \pi_{i-j}(\hat{r}x^n) \cdot \pi_j(x) = \pi_{i-1}^{\hat{r}x^n}$$

Assim, se $i = n + 1$, temos que a coordenada é r , e o caso contrário. Resta apenas verificar que a coordenada 0 é 0. Ora, a coordenada 0 se dá por $\pi_0(\hat{r}x^n)\pi_0(x) = 0$. \square

LEMA 8.7. Na notação anterior, seja $h : R \rightarrow R[x]$ dada por $h(r) = \hat{r}$. Então h é um homomorfismo injetor.

DEMONSTRAÇÃO. Sejam $r, s \in R$. Então:

- $h(r + s) = (r + s, 0, 0, \dots) = \hat{r} + \hat{s} = h(r) + h(s)$
- $h(rs) = (rs, 0, 0, \dots) = \hat{r} \cdot \hat{s} = h(r) \cdot h(s)$
- $h(1_R) = \hat{1} = (1_R, 0, 0, \dots) = 1_{R[x]} = 1_{R[x]}$.

A injetividade é óbvia. \square

PROPOSIÇÃO 8.8. Na notação anterior, para todo $p(x) \in R[x]$, existem $n \geq 0$ e $r_0, r_1, \dots, r_n \in R$ tais que $p(x) = \sum_{i=0}^n \hat{r}_i x^i$.

DEMONSTRAÇÃO. Se $p(x) = 0$, seja $n = 0$ e $r_0 = 0$. Caso contrário, seja $n = \text{gr } p(x)$ e $r_i = p_i$ para todo $i \leq n$. Então:

$$p(x) = (p_0, \dots, p_n, 0, \dots, 0) = (r_0, \dots, r_n, 0, \dots, 0) = \sum_{i=0}^n \hat{r}_i x^i$$

\square

PROPOSIÇÃO 8.9. Na notação anterior, se r_1, \dots, r_n e s_1, \dots, s_n são elementos de R , então: $\sum_{i=0}^n \hat{r}_i x^i = \sum_{i=0}^n \hat{s}_i x^i$ se, e somente se, $r_i = s_i$ para todo $i \leq n$.

DEMONSTRAÇÃO. A recíproca é imediata. Para a implicação direta, note que a igualdade nos diz que $(r_0, \dots, r_n, 0, 0, \dots) = (s_0, \dots, s_n, 0, 0, \dots)$, ou seja, $r_i = s_i$ para todo $i \leq n$. \square

Notação: abandona-se \hat{r} em favor de r , mesmo havendo ambiguidade de notação.