

Uma formalização da interpretação modal do
sistema intuicionista

Elían Babireski

2024

Resumo

Resumo aqui.

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Justificativa	4
1.2	Metas	4
1.3	Estruturação	4
2	Fundamentação	5
2.1	Sistemas	5
2.2	Traduções	6
2.3	Provadores	6
3	Formalização	7
3.1	Sistemas	7
3.2	Traduções	10

“Oh, you can’t help that,” said the Cat: “we’re all mad here. I’m mad. You’re mad.” “How do you know I’m mad?” said Alice. “You must be,” said the Cat, “or you wouldn’t have come here.”

—Lewis Carroll, Alice in Wonderland

Capítulo 1

Introdução

As lógicas modais consistem em um conjunto de extensões da lógica clássica que contam com a adição de um ou mais operadores, chamados modalidades, que qualificam sentenças. No caso do sistema **S4**, são adicionadas as modalidades de necessidade (\Box) e possibilidade (\Diamond) em conjunto à regra da necessitação¹ e os axiomas **K**: $\Box(A \rightarrow B) \rightarrow \Box A \rightarrow \Box B$, **T**: $\Box A \rightarrow A$ e **4**: $\Box A \rightarrow \Box \Box A$ [7]. Ademais, pode-se derivar nesse sistema, por meio da dualidade entre as modalidades², sentenças duais aos axiomas **T** e **4**, sendo elas **T_◇**: $A \rightarrow \Diamond A$ e **4_◇**: $\Diamond \Diamond A \rightarrow \Diamond A$, respectivamente [?].

As mônadas ganharam destaque na área de linguagens de programação desde que [5] formalizou uma metalinguagem que faz uso dessas estruturas para modelar noções de computação – como parcialidade, não-determinismo, exceções e continuções – de uma maneira puramente funcional. Pode-se notar uma grande semelhança entre as sentenças **T_◇** e **4_◇** e as transformações naturais monádicas $\eta: 1_C \rightarrow T$ e $\mu: T^2 \rightarrow T$, respectivamente. Nesse sentido, [6] demonstraram que se pode traduzir essa metalinguagem para o sistema **S4** da lógica modal, pelo qual se torna interessante analisar esse sistema como uma linguagem de programação sob a ótica do isomorfismo de Curry-Howard.

[7] apresentam duas traduções equivalentes da lógica intuicionista para o sistema **S4** da lógica modal, sendo um deles correspondente a uma abordagem *call-by-name* e outra a um abordagem *call-by-value*. Tais traduções possuem grande similaridade com as traduções da lógica intuicionista para a lógica linear definidas por [2]. Essas traduções equivalem à tradução por negação dupla que, por sua vez, equivalem a traduções *continuation-passing style* (CPS) em compiladores por meio do isomorfismo de Curry-Howard [?], o que torna esse tema interessante no ponto de vista de compilação.

Durante grande parte da história, provas lógicas e matemáticas eram validadas manualmente pela comunidade acadêmica, o que muitas vezes – a depender do tamanho e complexidade da prova – se mostrava ser um trabalho complexo

¹Se $\vdash A$ então $\vdash \Box A$

² $\Diamond A \equiv \neg \Box \neg A$

e sujeito a erros. Hoje em dia, existem *softwares* chamados assistentes de provas que permitem verificar – graças ao isomorfismo de Curry-Howard – a corretude de provas [?]. O assistente de provas que será usado neste trabalho é o Coq, que utiliza o cálculo de construções indutivas e um conjunto axiomático pequeno para permitir a escrita de provas simples e intuitivas [?].

Este trabalho será uma continuação do desenvolvimento da biblioteca de lógica modal no assistente de provas Coq feito em [?] e posteriormente expandido de forma a permitir a fusão de lógicas modais em [?]. Uma formalização similar de traduções de lógicas foi feito em [?], porém, neste caso, das lógicas clássica e intuicionista para a lógica linear.

1.1 Justificativa

1.2 Metas

1.3 Estruturação

Capítulo 2

Fundamentação

2.1 Sistemas

Conforme visto, as noções de sistema variam entre diferentes autores e permanece um campo em aberto. Para as necessidades deste trabalho, usaremos a definição proposta por [1], uma vez que se trata de uma definição simples e que, portanto, não traz elementos irrelevantes aos intuitos deste trabalho.

Definição 1 (Sistema). *Um sistema consiste num par $\mathbf{L} = \langle \mathcal{L}, \Vdash \rangle$, onde \mathcal{L} consiste em um conjunto de sentenças bem-formadas e $\Vdash : \wp(\mathcal{L}) \times \mathcal{L}$ em uma relação sobre as sentenças, sem demais condições.* \square

Cabe destacar que a definição de sistema provida foi definida com base em \Vdash , uma relação qualquer entre as sentenças, que pode ser uma relação de dedução, denotada \vdash , ou uma relação de satisfação, denotada \models . Propriedades da tradução podem ser provadas sobre qualquer uma dessas relações, como veremos adiante. Entretanto, neste trabalho, serão abordadas somente as relações de dedução.

Definição 2 (Assinatura). *Uma assinatura consiste num conjunto de operadores e suas respectivas aridades. A notação \circ^n denota um operador \circ com aridade $n \in \mathbb{N}$.* \square

Definiremos a noção de profundidade de uma sentença para que possamos realizar indução na profundidade da sentença, conforme Troelstra [7].

Definição 3 (Profundidade). *A profundidade $|\alpha|$ de uma sentença α consiste no comprimento do maior ramo de sua construção. Seja \circ um operador qualquer, define-se a profundidade recursivamente como:*

$$\begin{aligned} |p| &:= 0 \\ |\perp| &:= 0 \\ |\circ \alpha| &:= |\alpha| + 1 \\ |\alpha \circ \beta| &:= \max(|\alpha|, |\beta|) + 1. \end{aligned} \quad \square$$

Definição 4 (Esquema). *Definição.*

Definição 5 (Axiomatização). *Um sistema de Hilbert para um sistema $\mathbf{L} = \langle \mathcal{L}, \vdash \rangle$ consiste em um par $\mathcal{H} = \langle \mathcal{A}, \mathcal{R} \rangle$, sendo \mathcal{A} um conjunto de esquemas axiomas e \mathcal{R} um conjunto de regras de dedução.*

Definição 6 (Dedução). *Uma sucessão $\langle \varphi_i \mid 1 \leq i \leq n \rangle$, onde cada sentença φ_i trata-se de um axioma $\alpha \in \mathcal{A}$, uma assunção $\gamma \in \Gamma$ ou sentenças geradas pela aplicação de regras de dedução $\rho \in \mathcal{R}$ a sentenças anteriores, consiste em uma prova de $\Gamma \vdash \varphi_n$.* \square

2.2 Traduções

Traduções entre sistemas consistem em funções que mapeiam sentenças de um sistema a sentenças de outro sistema e garantem certas propriedades. As propriedades a serem garantidas variam e ainda são discutidas na literatura, deixando a definição exata de tradução – assim como houve com a definição de sistema – varie de acordo com a predileção de cada autor. Nesta seção, serão abordadas historicamente noções de tradução entre sistemas, bem como serão definidos e nomeados os conceitos de tradução que serão usados no restante deste trabalho.

Definição 7 (Tradução). *Uma sentença φ de um sistema $\mathbf{A} = \langle \mathcal{L}_{\mathbf{A}}, \vdash_{\mathbf{A}} \rangle$ pode ser traduzida a uma sentença φ^* em um sistema $\mathbf{B} = \langle \mathcal{L}_{\mathbf{B}}, \vdash_{\mathbf{B}} \rangle$ caso exista uma função $\bullet^* : \mathcal{L}_{\mathbf{A}} \rightarrow \mathcal{L}_{\mathbf{B}}$ que garanta que $\Gamma \vdash_{\mathbf{A}} \varphi \Leftrightarrow \Gamma^* \vdash_{\mathbf{B}} \varphi^*$.* \square

Notação. *Seja $\Gamma \in \wp(\mathcal{L}_{\mathbf{A}})$ um conjunto de sentenças e $\bullet^* : \mathcal{L}_{\mathbf{A}} \rightarrow \mathcal{L}_{\mathbf{B}}$ uma tradução. Γ^* denota o conjunto $\{\alpha^* \mid \alpha \in \mathcal{L}_{\mathbf{A}}\} \in \wp(\mathcal{L}_{\mathbf{B}})$, ou seja, a aplicação da tradução a todos os elementos do conjunto.* \square

Definição 8 (\bullet^\neg). *Define-se a tradução \bullet^\neg indutivamente da seguinte maneira:*

$$\begin{aligned} p^\neg &:= \neg \neg p \\ \perp^\neg &:= \perp \\ (\varphi \wedge \psi)^\neg &:= \neg \neg (\varphi^\neg \wedge \psi^\neg) \\ (\varphi \vee \psi)^\neg &:= \neg \neg (\varphi^\neg \vee \psi^\neg) \\ (\varphi \rightarrow \psi)^\neg &:= \neg \neg (\varphi^\neg \rightarrow \psi^\neg) \end{aligned} \quad \square$$

2.3 Provadores

Capítulo 3

Formalização

3.1 Sistemas

Definição 9 (\mathcal{L}_I). A linguagem do sistema intuicionista, denotada \mathcal{L}_I , consiste no menor conjunto induzido a partir das seguintes regras:

$$\begin{aligned}\perp &\in \mathcal{L}_I \\ \mathcal{P} &\subseteq \mathcal{L}_I \\ \alpha, \beta \in \mathcal{L}_I &\Rightarrow \alpha \circ \beta \in \mathcal{L}_I, \text{ para } \circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}.\end{aligned}\quad \square$$

Notação. Serão usadas as seguintes abreviações:

$$\begin{aligned}\top &:= \perp \rightarrow \perp \\ \neg\alpha &:= \alpha \rightarrow \perp \\ \alpha \leftrightarrow \beta &:= (\alpha \rightarrow \beta) \wedge \beta \rightarrow \alpha\end{aligned}$$

Definição 10. A axiomatização do sistema intuicionista consiste nos seguintes esquemas e regras:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_1 & \quad \alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \\ \mathbf{A}_2 & \quad (\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\alpha \rightarrow \gamma) \\ \mathbf{A}_3 & \quad \alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \wedge \beta \\ \mathbf{A}_4 & \quad \alpha \wedge \beta \rightarrow \alpha \\ \mathbf{A}_5 & \quad \alpha \wedge \beta \rightarrow \beta \\ \mathbf{A}_6 & \quad \alpha \rightarrow \alpha \vee \beta \\ \mathbf{A}_7 & \quad \beta \rightarrow \alpha \vee \beta \\ \mathbf{A}_8 & \quad (\alpha \rightarrow \gamma) \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \vee \beta \rightarrow \gamma) \\ \mathbf{A}_\perp & \quad \perp \rightarrow \alpha \\ \mathbf{R}_1 & \quad \text{Se } \vdash \alpha \text{ e } \vdash \alpha \rightarrow \beta, \text{ então } \vdash \beta.\end{aligned}\quad \square$$

Definição 11 (\mathcal{L}_M). A linguagem do sistemas modais, denotada \mathcal{L}_M , consiste no menor conjunto induzido a partir das seguintes regras:

$$\begin{aligned} \perp &\in \mathcal{L}_M \\ \mathcal{P} &\subseteq \mathcal{L}_M \\ \alpha \in \mathcal{L}_M &\Rightarrow \Box \alpha \in \mathcal{L}_M \\ \alpha, \beta \in \mathcal{L}_M &\Rightarrow \alpha \circ \beta \in \mathcal{L}_M, \text{ para } \circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}. \end{aligned} \quad \square$$

Notação. Serão usadas as seguintes abreviações:

$$\begin{aligned} \top &:= \perp \rightarrow \perp \\ \neg \alpha &:= \alpha \rightarrow \perp \\ \Diamond \alpha &:= \neg \Box \neg \alpha \\ \alpha \leftrightarrow \beta &:= (\alpha \rightarrow \beta) \wedge \beta \rightarrow \alpha \end{aligned}$$

Definição 12. A axiomatização do sistema modal consiste nos seguintes esquemas e regras:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 \quad &\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \\ \mathbf{A}_2 \quad &(\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow (\alpha \rightarrow \gamma) \\ \mathbf{A}_3 \quad &\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha \wedge \beta \\ \mathbf{A}_4 \quad &\alpha \wedge \beta \rightarrow \alpha \\ \mathbf{A}_5 \quad &\alpha \wedge \beta \rightarrow \beta \\ \mathbf{A}_6 \quad &\alpha \rightarrow \alpha \vee \beta \\ \mathbf{A}_7 \quad &\beta \rightarrow \alpha \vee \beta \\ \mathbf{A}_8 \quad &(\alpha \rightarrow \gamma) \rightarrow (\beta \rightarrow \gamma) \rightarrow (\alpha \vee \beta \rightarrow \gamma) \\ \mathbf{A}_{\neg} \quad &\neg \neg \alpha \rightarrow \alpha \\ \mathbf{B}_1 \quad &\Box(\alpha \rightarrow \beta) \rightarrow \Box \alpha \rightarrow \Box \beta \\ \mathbf{B}_2 \quad &\Box \alpha \rightarrow \alpha \\ \mathbf{B}_3 \quad &\Box \alpha \rightarrow \Box \Box \alpha \\ \mathbf{R}_1 \quad &\text{Se } \vdash \alpha \text{ e } \vdash \alpha \rightarrow \beta, \text{ então } \vdash \beta \\ \mathbf{R}_2 \quad &\text{Se } \vdash \alpha, \text{ então } \vdash \Box \alpha. \end{aligned} \quad \square$$

Provaremos, para o sistema modal apresentado, uma variação do teorema da dedução, que permite simplificar muitas das demonstrações apresentadas futuramente neste trabalho.

Teorema 1. $\forall \Gamma \cup \{\alpha, \beta\} \in \wp(\mathcal{L}_M) . \Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta \Rightarrow \Gamma \vdash \Box(\alpha \rightarrow \beta)$.

Demonstração. Seja Γ um conjunto de sentenças e sejam α e β sentenças de modo que $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta$, deve-se provar que $\Gamma \vdash \Box(\alpha \rightarrow \beta)$. Como $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta$, existe uma prova de β a partir de $\Gamma \cup \{\alpha\}$. A prova baseia-se numa indução sobre o tamanho n da prova.

Caso 1 (Base). Para a base requer-se considerar os seguintes casos: **(1)** β consiste num axioma, **(2)** $\beta \in \Gamma$ e **(3)** $\beta = \alpha$.

Caso 1.1 ($\beta \in \mathcal{A}$).

1	$\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \beta$	\mathbf{A}_1
2	β	\mathbf{A}_β
3	$\alpha \rightarrow \beta$	$\mathbf{R}_1 \langle 1, 2 \rangle$
4	$\Box(\alpha \rightarrow \beta)$	$\mathbf{R}_2 \langle 3 \rangle$

Caso 1.2 ($\beta \in \Gamma$).

1	$\beta \rightarrow \alpha \rightarrow \beta$	\mathbf{A}_1
2	β	\mathbf{P}
3	$\alpha \rightarrow \beta$	$\mathbf{R}_1 \langle 1, 2 \rangle$
4	$\Box(\alpha \rightarrow \beta)$	$\mathbf{R}_2 \langle 3 \rangle$

Caso 1.3 ($\beta = \alpha$).

1	$\alpha \rightarrow \alpha$	\mathbf{L}_1
2	$\Box(\alpha \rightarrow \alpha)$	$\mathbf{R}_2 \langle 1 \rangle$

Caso 2 (Passo). Supõe-se que, para qualquer prova de $\Gamma \cup \{\alpha\} \vdash \beta$ com tamanho k , tem-se que $\Gamma \vdash \Box(\alpha \rightarrow \beta)$. Deve-se mostrar que a proposição segue verdadeira caso a prova tenha tamanho $k + 1$. Assim, sendo $\langle \varphi_i \mid 1 \leq i \leq k + 1 \rangle$ uma sucessão de dedução com $\varphi_{k+1} = \beta$, requer-se considerar os seguintes casos:

Caso 2.1 ($\beta \in \mathcal{A}$). *Vide* caso $\mathbf{C}_{1.1}$.

Caso 2.2 ($\beta \in \Gamma$). *Vide* caso $\mathbf{C}_{1.2}$.

Caso 2.3 ($\beta = \alpha$). *Vide* caso $\mathbf{C}_{1.3}$.

Caso 2.4 (\mathbf{R}_1).

Caso 2.5 (\mathbf{R}_2).

□

3.2 Traduções

A primeira tradução do sistema intuicionista ao sistema modal foi proposta por Gödel [3] motivado pela possibilidade de leitura da necessidade como uma modalidade de construtividade. Ou seja, por meio dessa tradução, a sentença $\Box\varphi$ poderia ser lida como φ *pode ser provada construtivamente* [7]. Gödel conjecturou a corretude fraca dessa tradução, que foi posteriormente provada por McKinsey e Tarski [4] em conjunto com sua completude fraca.

Definição 13 (\bullet°). *Define-se a tradução \bullet° indutivamente da seguinte maneira:*

$$\begin{aligned} p^\circ &:= p \\ \perp^\circ &:= \perp \\ (\varphi \wedge \psi)^\circ &:= \varphi^\circ \wedge \psi^\circ \\ (\varphi \vee \psi)^\circ &:= \Box\varphi^\circ \vee \Box\psi^\circ \\ (\varphi \rightarrow \psi)^\circ &:= \Box\varphi^\circ \rightarrow \psi^\circ \end{aligned} \quad \square$$

Definição 14 (\bullet^\square). *Define-se a tradução \bullet^\square indutivamente da seguinte maneira:*

$$\begin{aligned} p^\square &:= \Box p \\ \perp^\square &:= \perp \\ (\varphi \wedge \psi)^\square &:= \varphi^\square \wedge \psi^\square \\ (\varphi \vee \psi)^\square &:= \varphi^\square \vee \psi^\square \\ (\varphi \rightarrow \psi)^\square &:= \Box(\varphi^\square \rightarrow \psi^\square) \end{aligned} \quad \square$$

Faz-se interessante pontuar que as traduções \bullet° e \bullet^\square correspondem, respectivamente, às traduções \bullet° e \bullet^* do sistema intuicionista ao sistema linear providas por Girard [2], sendo as primeiras correspondentes a uma ordem de avaliação por nome (*call-by-name*) e as segundas a uma ordem de avaliação por valor (*call-by-value*). Ademais, as duas traduções providas são equivalentes, conforme demonstrado pelo teorema **T₂**.

Teorema 2. $\forall \alpha \in \mathcal{L}_I . \Box\alpha^\circ \leftrightarrow \alpha^\square$.

Demonstração. Prova por indução na profundidade de α .

Caso 1 (Base). Para $|\alpha| = 0$, existem dois casos a serem considerados.

Caso 1.1 ($\alpha = a$). $a^\circ = a$ e $a^\square = \Box a$, assim $\Box a^\circ = a^\square$ e, portanto, $\Box a^\circ \leftrightarrow a^\square$.

Caso 2.1 ($\alpha = \perp$). $\perp^\circ = \perp$ e $\perp^\square = \perp$. A ida $\square\perp \rightarrow \perp$ consiste em um axioma, sendo, portando provada trivialmente pela sucessão de dedução $\langle \square\perp \rightarrow \perp \rangle$. A volta $\perp \rightarrow \square\perp$ equivale a provar, por meio do teorema da dedução, que $\{\perp\} \vdash_{\mathbf{M}} \square\perp$, o que pode ser provado trivialmente pela sucessão de dedução $\langle \perp, \square\perp \rangle$, que consiste na invocação da premissa e aplicação da regra da necessitação, nessa ordem.

Caso 2 (Passo). No passo, deve-se demonstrar que, caso $\square\alpha^\circ \leftrightarrow \alpha^\square$ para $|\alpha| = n$, então $\square\alpha^\circ \leftrightarrow \alpha^\square$ para $|\alpha| = n + 1$, onde $n \in \mathbb{N}$. Assim, seja $\square\alpha^\circ \leftrightarrow \alpha^\square$ uma proposição verdadeira para $|\alpha| = k$, onde $k \in \mathbb{N}$. Existem os seguintes casos a serem considerados para $|\alpha| = k + 1$.

Caso 2.1 ($\alpha = \alpha_1 \wedge \alpha_2$).

Caso 2.2 ($\alpha = \alpha_1 \vee \alpha_2$).

Caso 2.3 ($\alpha = \alpha_1 \rightarrow \alpha_2$).

□

Teorema 3. $\forall \alpha \in \mathcal{L}_{\mathbf{I}} . \Gamma \vdash_{\mathbf{I}} \alpha \Rightarrow \Gamma^\square \vdash_{\mathbf{M}} \alpha^\square$

Demonstração. Como $\Gamma \vdash_{\mathbf{I}} \alpha$, sabe-se que existe uma prova $\langle \varphi_i \mid 1 \leq i \leq n \rangle$ tal que $\varphi_n = \alpha$. A demonstração deste teorema será feita por indução no tamanho n da prova.

Passo ($n = 1$). A prova, caso possua tamanho $n = 1$, tem obrigatoriamente a forma $\langle \alpha \rangle$. Deste modo, existem duas casos a serem considerados: α ser um axioma ou α ser uma premissa.

Caso 1 ($\alpha \in \Gamma$). Como $\alpha \in \Gamma$, sabe-se que $\alpha^\square \in \Gamma^\square$, uma vez que $\Gamma^\square = \{\varphi^\square \mid \varphi \in \Gamma\}$. Desta forma, $\langle \alpha^\square \rangle$ constitui uma prova para $\Gamma^\square \vdash \alpha^\square$.

Caso 2 ($\alpha \in \mathcal{A}$).

Caso 2.1 (**A₁**). Deve-se demonstrar que $\vdash \square(\alpha^\square \rightarrow \square(\beta^\square \rightarrow \alpha^\square))$. Pelo teorema **T₁**, basta provar que $\{\alpha^\square, \beta^\square\} \vdash \alpha^\square$, o que pode ser feito pela seguinte sucessão de dedução:

1	α^\square	P
---	------------------	----------

Caso 2.2 (**A₂**).

1	$\Box(\alpha^\Box \rightarrow \beta^\Box) \rightarrow \alpha^\Box \rightarrow \beta^\Box$
2	$\Box(\alpha^\Box \rightarrow \beta^\Box)$
3	$\alpha^\Box \rightarrow \beta^\Box$
4	α^\Box
5	β^\Box
6	$\Box(\alpha^\Box \rightarrow \Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box)) \rightarrow \alpha^\Box \rightarrow \Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box)$
7	$\Box(\alpha^\Box \rightarrow \Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box))$
8	$\alpha^\Box \rightarrow \Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box)$
9	$\Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box)$
10	$\Box(\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box) \rightarrow \beta^\Box \rightarrow \gamma^\Box$
11	$\beta^\Box \rightarrow \gamma^\Box$
12	γ^\Box

Caso 2.3 (\mathbf{A}_3).

1	$\alpha^\Box \rightarrow \beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box \wedge \beta^\Box$	\mathbf{A}_3
2	α^\Box	\mathbf{P}
3	$\beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box \wedge \beta^\Box$	$\mathbf{R}_1 \langle 1, 2 \rangle$
4	β^\Box	\mathbf{P}
5	$\alpha^\Box \wedge \beta^\Box$	$\mathbf{R}_1 \langle 3, 4 \rangle$

Caso 2.4 (\mathbf{A}_4).

1	$\alpha^\Box \wedge \beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box$	\mathbf{A}_4
2	$\Box(\alpha^\Box \wedge \beta^\Box \rightarrow \alpha^\Box)$	$\mathbf{R}_2 \langle 1 \rangle$

Caso 2.5 (\mathbf{A}_5).

1	$\alpha^\Box \wedge \beta^\Box \rightarrow \beta^\Box$	\mathbf{A}_5
2	$\Box(\alpha^\Box \wedge \beta^\Box \rightarrow \beta^\Box)$	$\mathbf{R}_2 \langle 1 \rangle$

Caso 2.6 (\mathbf{A}_6).

1	$\alpha^\Box \rightarrow \alpha^\Box \vee \beta^\Box$	\mathbf{A}_6
2	$\Box(\alpha^\Box \rightarrow \alpha^\Box \vee \beta^\Box)$	$\mathbf{R}_2 \langle 1 \rangle$

Caso 2.7 (\mathbf{A}_7).

1	$\beta^\square \rightarrow \alpha^\square \vee \beta^\square$	\mathbf{A}_7
2	$\Box(\beta^\square \rightarrow \alpha^\square \vee \beta^\square)$	$\mathbf{R}_2 \langle 1 \rangle$

Caso 2.8 (\mathbf{A}_8).

1	$(\alpha^\square \rightarrow \gamma^\square) \rightarrow (\beta^\square \rightarrow \gamma^\square) \rightarrow \alpha^\square \vee \beta^\square \rightarrow \gamma^\square$
2	$\Box(\alpha^\square \rightarrow \gamma^\square) \rightarrow \alpha^\square \rightarrow \gamma^\square$
3	$\Box(\alpha^\square \rightarrow \gamma^\square)$
4	$\alpha^\square \rightarrow \gamma^\square$
5	$(\beta^\square \rightarrow \gamma^\square) \rightarrow \alpha^\square \vee \beta^\square \rightarrow \gamma^\square$
6	$\Box(\beta^\square \rightarrow \gamma^\square) \rightarrow \beta^\square \rightarrow \gamma^\square$
7	$\Box(\beta^\square \rightarrow \gamma^\square)$
8	$\beta^\square \rightarrow \gamma^\square$
9	$\alpha^\square \vee \beta^\square \rightarrow \gamma^\square$
10	$\alpha^\square \vee \beta^\square$
11	γ^\square

Caso 2.9 (\mathbf{A}_\perp). Deve-se demonstrar que $\vdash \Box(\perp \rightarrow \alpha^\square)$. Pelo teorema \mathbf{T}_1 , basta provar que $\{\perp\} \vdash \alpha^\square$, o que pode ser feito pela seguinte sucessão de dedução:

1	$((\alpha^\square \rightarrow \perp) \rightarrow \perp) \rightarrow \alpha^\square$	\mathbf{A}_\neg
2	$\perp \rightarrow (\alpha^\square \rightarrow \perp) \rightarrow \perp$	\mathbf{A}_1
3	\perp	\mathbf{P}
4	$(\alpha^\square \rightarrow \perp) \rightarrow \perp$	$\mathbf{R}_1 \langle 2, 3 \rangle$
5	α^\square	$\mathbf{R}_1 \langle 1, 4 \rangle$

Caso 2.9 (\mathbf{R}_1). Deve-se demonstrar que, se $\vdash \Box(\alpha^\square \rightarrow \beta^\square)$ (\mathbf{H}_1) e $\vdash \alpha^\square$ (\mathbf{H}_2), então β^\square . Isso pode ser feito pela seguinte sucessão de dedução:

1	$\Box(\alpha^\square \rightarrow \beta^\square) \rightarrow \alpha^\square \rightarrow \beta^\square$	\mathbf{B}_2
2	$\Box(\alpha^\square \rightarrow \beta^\square)$	\mathbf{H}_1
3	$\alpha^\square \rightarrow \beta^\square$	$\mathbf{R}_1 \langle 1, 2 \rangle$
4	α^\square	\mathbf{H}_2
5	β^\square	$\mathbf{R}_1 \langle 3, 4 \rangle$



Referências Bibliográficas

- [1] Jean-Yves Béziau. Universal logic. *Logica*, 1994.
- [2] Jean-Yves Girard. Linear logic. *Theoretical Computer Science*, 1987.
- [3] Kurt Gödel. Eine Interpretation des intuitionistischen Aussagenkalküls. *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums*, 1933.
- [4] John Charles Chenoweth McKinsey and Alfred Tarski. Some theorems about the sentential calculi of Lewis and Heyting. *The Journal of Symbolic Logic*, 1948.
- [5] Eugenio Moggi. Notions of computation and monads. *Information and Computation*, 1991.
- [6] Frank Pfenning and Rowan Davies. A judgmental reconstruction of modal logic. *Mathematical Structures in Computer Science*, 2001.
- [7] Anne Sjerp Troelstra and Helmut Schwichtenberg. *Basic proof theory*. Cambridge University Press, 2000.