



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

PPA - Un asistente de demostración para lógica de primer orden con extracción de testigos usando la traducción de Friedman

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Computación

Manuel Panichelli

Director: Pablo Barenbaum
Buenos Aires, 2024

PPA - UN ASISTENTE DE DEMOSTRACIÓN PARA LÓGICA DE PRIMER ORDEN CON EXTRACCIÓN DE TESTIGOS USANDO LA TRADUCCIÓN DE FRIEDMAN

Los *asistentes de demostración* son programas que facilitan la escritura de demostraciones matemáticas, que pueden ser usados para facilitar la colaboración masiva o hacer verificación formal de programas. Existen muchos asistentes como Mizar, Coq e Isabelle, basados en distintas teorías. Un criterio deseable que pueden cumplir es el de De Bruijn: a partir de demostraciones en su lenguaje se pueden extraer otras más elementales, que puedan ser chequeados por un programa independiente.

En esta tesis se presenta PPA, un asistente de demostración para lógica clásica de primer orden. Cumple con el criterio de De Bruijn, generando demostraciones en el sistema lógico de *deducción natural* a partir de demostraciones escritas en un lenguaje de alto nivel, cuyo objetivo es ser similar a cómo serían escritas en lenguaje natural. Tiene un mecanismo principal de demostración, el *by*, que por debajo cuenta con un *solver* heurístico para lógica de primer orden que facilita la escritura de demostraciones. Está inspirado en el mecanismo análogo en Mizar.

Algunos asistentes implementan la *extracción de testigos de existencial*. Dada una demostración de $\exists x.p(x)$, se extrae un *testigo* t tal que cumpla $p(t)$. Es sencillo hacerlo sobre lógica intuicionista, pues es constructiva, pero un desafío sobre lógica clásica, que no lo es. Para ello hay dos grandes categorías: directas (mediante semántica operacional de cálculos λ clásicos, como realizabilidad clásica) o indirectas (mediante traducciones a lógica intuicionista o similares).

PPA implementa la extracción de forma indirecta usando la traducción de Friedman, que permite traducir demostraciones clásicas de fórmulas Π_2^0 de la forma $\forall y_0 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi$ a intuicionistas. Se describe cómo pueden ser normalizadas usando reglas de reducción bien conocidas, isomorfas a la semántica operacional del cálculo lambda vistas desde el isomorfismo Curry-Howard. Finalmente, de una demostración normalizada se podrá extraer un testigo. Identificamos algunos detalles en la implementación práctica de la traducción, que limitan las fórmulas para las cuales se puede usar (más allá de la limitación teórica de Π_2^0) y también limitan las axiomatizaciones de las teorías que se pueden hacer.

Palabras claves: asistente de demostración, lógica de primer orden, deducción natural, lógica clásica, lógica intuicionista, extracción de testigos, traducción de Friedman.

PPA - A PROOF-ASSISTANT FOR FIRST-ORDER LOGIC WITH WITNESS EXTRACTION USING FRIEDMAN'S TRANSLATION

In a galaxy far, far away, a psychopathic emperor and his most trusted servant – a former Jedi Knight known as Darth Vader – are ruling a universe with fear. They have built a horrifying weapon known as the Death Star, a giant battle station capable of annihilating a world in less than a second. When the Death Star's master plans are captured by the fledgling Rebel Alliance, Vader starts a pursuit of the ship carrying them. A young dissident Senator, Leia Organa, is aboard the ship & puts the plans into a maintenance robot named R2-D2. Although she is captured, the Death Star plans cannot be found, as R2 & his companion, a tall robot named C-3PO, have escaped to the desert world of Tatooine below. Through a series of mishaps, the robots end up in the hands of a farm boy named Luke Skywalker, who lives with his Uncle Owen & Aunt Beru. Owen & Beru are viciously murdered by the Empire's stormtroopers who are trying to recover the plans, and Luke & the robots meet with former Jedi Knight Obi-Wan Kenobi to try to return the plans to Leia Organa's home, Alderaan. After contracting a pilot named Han Solo & his Wookiee companion Chewbacca, they escape an Imperial blockade. But when they reach Alderaan's coordinates, they find it destroyed - by the Death Star. They soon find themselves caught in a tractor beam & pulled into the Death Star. Although they rescue Leia Organa from the Death Star after a series of narrow escapes, Kenobi becomes one with the Force after being killed by his former pupil - Darth Vader. They reach the Alliance's base on Yavin's fourth moon, but the Imperials are in hot pursuit with the Death Star, and plan to annihilate the Rebel base. The Rebels must quickly find a way to eliminate the Death Star before it destroys them as it did Alderaan (aprox. 200 palabras).

Keywords: War, Rebellion, Wookie, Jedi, The Force, Empire (no menos de 5).

AGRADECIMIENTOS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Fusce sapien ipsum, aliquet eget convallis at, adipiscing non odio. Donec porttitor tincidunt cursus. In tellus dui, varius sed scelerisque faucibus, sagittis non magna. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Mauris et luctus justo. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Mauris sit amet purus massa, sed sodales justo. Mauris id mi sed orci porttitor dictum. Donec vitae mi non leo consectetur tempus vel et sapien. Curabitur enim quam, sollicitudin id iaculis id, congue euismod diam. Sed in eros nec urna lacinia porttitor ut vitae nulla. Ut mattis, erat et laoreet feugiat, lacus urna hendrerit nisi, at tincidunt dui justo at felis. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Ut iaculis euismod magna et consequat. Mauris eu augue in ipsum elementum dictum. Sed accumsan, velit vel vehicula dignissim, nibh tellus consequat metus, vel fringilla neque dolor in dolor. Aliquam ac justo ut lectus iaculis pharetra vitae sed turpis. Aliquam pulvinar lorem vel ipsum auctor et hendrerit nisl molestie. Donec id felis nec ante placerat vehicula. Sed lacus risus, aliquet vel facilisis eu, placerat vitae augue.

Índice general

1..	Introducción	1
1.1.	Lógica de primer orden	2
1.2.	Arquitectura de ppa	4
1.3.	Estructura del escrito	4
2..	Deducción natural	6
2.1.	El sistema de deducción natural	7
2.1.1.	Reglas de inferencia	9
2.1.2.	Ejemplo introductorio	9
2.2.	Intuición detrás de las reglas	10
2.2.1.	Reglas base	10
2.2.2.	Reglas de conjunciones y disyunciones	11
2.2.3.	Reglas de implicación y negación	11
2.2.4.	Reglas de cuantificadores	11
2.3.	Ajustes para generación de demostraciones	13
2.3.1.	Hipótesis etiquetadas	13
2.3.2.	Variables libres en contexto	14
2.4.	Reglas admisibles	14
2.5.	Algoritmos	15
2.5.1.	Chequeador	15
2.5.2.	Alfa equivalencia	15
2.5.3.	Sustitución sin capturas	16
3..	El lenguaje PPA	18
3.1.	Interfaz	22
3.1.1.	Identificadores	22
3.1.2.	Comentarios	23
3.1.3.	Fórmulas	23
3.2.	Demostraciones	23
3.2.1.	Contexto	24
3.2.2.	by - el mecanismo principal de demostración	24
3.2.3.	Comandos y reglas de inferencia	25
3.2.4.	Descarga de conjunciones	27
3.2.5.	Otros comandos	28
4..	El certificador de PPA	29
4.1.	Certificados	30
4.2.	Contextos	30
4.2.1.	Contexto local	31
4.3.	Certificado de demostraciones	31
4.4.	Implementación del by	32
4.4.1.	Certificado del by	34
4.4.2.	Razonamiento por el absurdo	35

4.4.3.	DNF	36
4.4.4.	Contradicciones	38
4.4.5.	Eliminación de cuantificadores universales	39
4.4.6.	Poder expresivo	42
4.4.7.	Azúcar sintáctico	43
4.5.	Descarga de conjunciones	43
4.6.	Comandos correspondientes a reglas de inferencia	44
4.7.	Comandos adicionales	45
5..	Extracción de testigos de existenciales	46
5.1.	La lógica clásica no es constructiva	47
5.2.	Lógica intuicionista	48
5.3.	Estrategia de extracción de testigos	49
5.4.	Traducción de Friedman	49
5.4.1.	Traducción de doble negación	49
5.4.2.	El truco de Friedman	51
5.4.3.	Versiones de la traducción	52
5.4.4.	Traducción de demostraciones	57
5.5.	Normalización (o reducción)	61
5.5.1.	Sustituciones	62
5.5.2.	Algoritmo de reducción	64
5.5.3.	Limitaciones	64
5.6.	Manteniendo el contexto	65
5.7.	Otros métodos de extracción	68
6..	La herramienta ppa	69
6.1.	Instalación	70
6.2.	Interfaz y ejemplos	70
6.2.1.	check - Chequeo de programas	70
6.2.2.	extract - Extracción de testigos	71
6.3.	Detalles de implementación	72
6.3.1.	Parser y Lexer	73
6.3.2.	Modelado de deducción natural	73
7..	Conclusiones	78
7.1.	Trabajo futuro	79

1. INTRODUCCIÓN

Los asistentes de demostración son herramientas que facilitan la escritura y chequeo de demostraciones en una computadora. Pueden ser usados para formalizar teoremas, realizar verificación formal de programas, entre otros. A diferencia de escribir demostraciones y chequearlas manualmente, el uso de asistentes permite la colaboración a gran escala: no es necesario confiar ni revisar a detalle las demostraciones que hace el resto del equipo, alcanza con que el asistente las considere válidas. También facilitan el proceso de generar demostraciones mediante LLMs, que muchas veces generan razonamientos lógicos erróneos, lo cual sería inviable chequear a mano. Pero podemos delegar su verificación al asistente.

Trabajan con distintas *teorías*. Por ejemplo, el asistente Mizar con lógica de primer orden, Coq con teoría de tipos (cálculo de construcciones o CoC) y Agda también (teoría unificada de tipos dependientes, basada en teoría de tipos de Martin-Löf).

Una propiedad deseable cumplida por muchos asistentes es el **criterio de De Bruijn**. En principio, para estar seguros de que una demostración es correcta sería necesario confiar en la implementación del asistente, que puede ser muy compleja. Un asistente se dice que cumple con el criterio si construye una demostración en un formato elemental, sencillo, que pueda ser chequeada por un programa independiente, escrito por cualquiera que desconfíe de la implementación original del asistente. De esa forma no es necesario confiar en ella.

En este trabajo implementamos una asistente de demostración *PPA* (*Pani's proof assistant*) inspirado en Mizar. Trabaja sobre teorías de lógica clásica de primer orden. Cumple con el criterio de De Bruijn porque *certifica* las demostraciones en el lenguaje de alto nivel PPA, generando demostraciones de bajo nivel de deducción natural: un sistema lógico que permite escribir demostraciones mediante reglas de inferencia. Además, implementa extracción de testigos de existenciales. Su sintaxis está inspirada en el *mathematical vernacular* introducido por Freek Wiedijk en [Wie], que tiene por objetivo ser lo más parecido posible al lenguaje natural. No es un demostrador automático de teoremas, pero incluye un pequeño demostrador heurístico para lógica de primer orden y completo para proposicional, que simplifica la escritura de demostraciones.

Para la extracción de testigos, es deseable que las demostraciones sean **constructivas**: una demostración de $\exists x.p(x)$ nos debe decir cómo encontrar a un objeto t que cumpla con $p(t)$. PPA usa lógica clásica, que no siempre es constructiva por los principios de razonamiento clásicos como LEM. Siempre vale $A \vee \neg A$, y podemos demostrar usando eso sin determinar exactamente cual de las dos vale. Los asistentes como Coq lo aseguran mediante el uso de **lógica intuicionista**, que siempre es constructiva.

En este trabajo, la extracción se hace de forma *indirecta* en dos pasos. Primero hacemos uso de la **traducción de Friedman** [Miq11], que permite traducir una demostración clásica a una intuicionista para cierta clase de fórmulas: las Π_2^0 , de la pinta $\forall x_1 \dots \forall x_n. \exists y. \varphi$. Luego, *normalizamos* la demostración intuicionista, y de su forma normal extraemos el testigo del existencial. No conocemos un asistente de demostración de lógica clásica que implemente la traducción de Friedman original para extraer testigos. La implementación de un mecanismo de extracción indirecto es el aporte principal de este trabajo.

1.1. Lógica de primer orden

A continuación se presentan definiciones preliminares de lógica de primer orden. Suponemos dados,

- Un conjunto infinito numerable de **variables** $\{x, y, z, \dots\}$

- Un conjunto infinito numerable de **símbolos de función** $\{f, g, h, \dots\}$
- Un conjunto infinito numerable de **símbolos de predicado** $\{p, q, r, \dots\}$

Def. 1 (Términos). Los términos están dados por la gramática

$$\begin{array}{ll} t ::= x & \text{(variables)} \\ \quad | f(t_1, \dots, t_n) & \text{(funciones)} \end{array}$$

Def. 2 (Fórmulas). Las fórmulas están dadas por la gramática

$$\begin{array}{ll} A, B ::= p(t_1, \dots, t_n) & \text{(predicados)} \\ \quad | \perp \mid \top & \text{(verdadero y falso)} \\ \quad | A \wedge B & \text{(conjunción)} \\ \quad | A \vee B & \text{(disyunción)} \\ \quad | A \rightarrow B & \text{(implicación)} \\ \quad | \neg A & \text{(negación)} \\ \quad | \forall x.A & \text{(cuantificador universal)} \\ \quad | \exists x.A & \text{(cuantificador existencial)} \end{array}$$

Los predicados son **fórmulas atómicas**. Los de aridad 0 además son llamados *variables proposicionales*.

Notación. Usamos

- $a, b, c, \dots, A, B, C, \dots$ y φ, ψ, \dots para referirnos a fórmulas.
- t, u, \dots para referirnos a términos

Def. 3 (Variables libres y ligadas). Las variables pueden ocurrir libres o ligadas. Los cuantificadores ligan a las variables, y usamos $fv(())A$ para referirnos a las variables libres de una fórmula. Se define por inducción estructural de la siguiente forma.

- Términos

$$\begin{aligned} fv(x) &= \{x\} \\ fv(f(t_1, \dots, t_n)) &= \bigcup_{i \in 1..n} fv(t_i) \end{aligned}$$

- Fórmulas

$$\begin{aligned} fv(\perp) &= \emptyset \\ fv(\top) &= \emptyset \\ fv(p(t_1, \dots, t_n)) &= \bigcup_{i \in 1..n} fv(t_i) \\ fv(A \wedge B) &= fv(A) \cup fv(B) \\ fv(A \vee B) &= fv(A) \cup fv(B) \\ fv(A \rightarrow B) &= fv(A) \cup fv(B) \\ fv(\neg A) &= fv(A) \\ fv(\forall x.A) &= fv(A) \setminus x \\ fv(\exists x.A) &= fv(A) \setminus x \end{aligned}$$

1.2. Arquitectura de ppa

A lo largo del trabajo, usaremos “PPA” para referirnos a dos cosas separadas: PPA el lenguaje para escribir demostraciones, y **ppa** la herramienta que implementa el lenguaje y con su extracción de testigos. Esta última está implementada en **Haskell**. Funcionalmente tiene la siguiente arquitectura, representada en la **Figura 1.1 (Arquitectura funcional de ppa)**

- El usuario escribe una demostración en alto nivel en el lenguaje PPA
- Puede *chequear* la demostración, que primero la **certifica** generando una demostración de deducción natural (el “certificado”) que es chequeada por su correctitud.
- Luego, si es una demostración de un existencial, el usuario puede optar por *extraer un testigo*: primero se **traduce** la demostración de clásica a intuicionista, y luego se reduce hacia su formal normal de la cual se puede tomar el testigo.

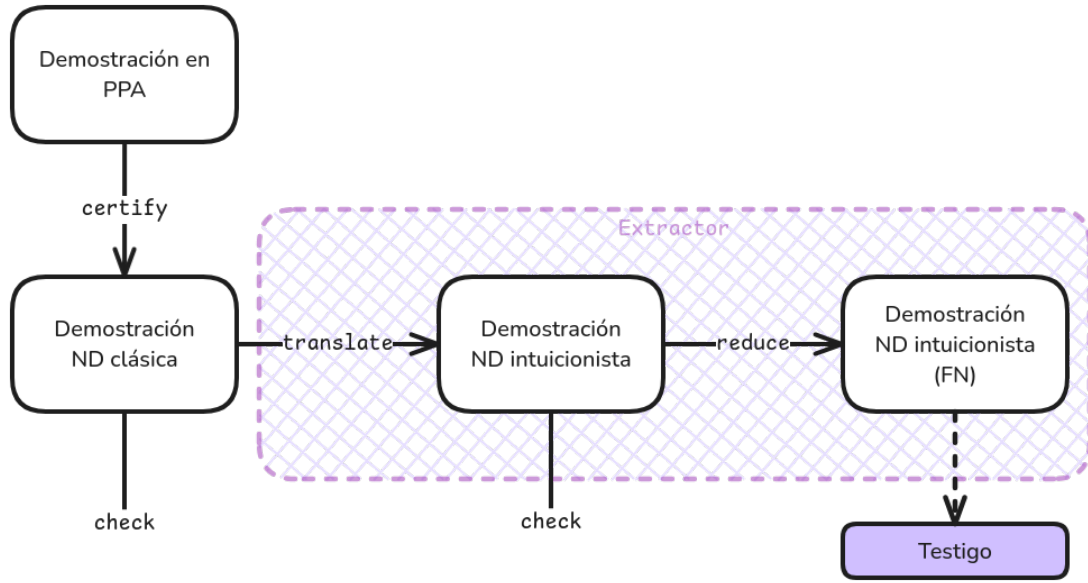
Las definiciones principales son las siguientes

- El tipo **type Result a = Either String a** es la mónada principal que se usa para permitir devolver resultados correctos o errores.
- **certify :: Program -> Result Context**. Implementada por el módulo **PPA.Certifier**. Certifica un *programa* (axiomas y teoremas) generando un *contexto* (una demostración en deducción natural para cada teorema).
- **check :: Env -> Proof -> Form -> CheckResult**. Implementada por el módulo **ND.Checker**. Chequea una demostración de una fórmula asumiendo un entorno o contexto de demostración.
- **translateFriedman :: Proof -> FormPi02 -> (Proof, R)**. Implementada por el módulo **Extractor.Translator.Proof**. Traduce una demostración clásica de una fórmula Π_2^0 generando una demostración intuicionista, usando la traducción de Friedman relativizando la negación con **R**.
- **reduce :: Proof -> Proof**. Reduce una demostración a su forma normal. Implementada en el módulo **Extractor.Reducer**.

1.3. Estructura del escrito

El trabajo se divide en 5 capítulos principales además de la introducción y la conclusión. Comenzamos por el **Capítulo 2 (Deducción natural)** en el que se presenta de forma completa el sistema de deducción natural usado para los certificados. Se introducen las reglas de inferencia junto con sus intuiciones, el concepto de *reglas admisibles*, demostraciones de ejemplo y algunos algoritmos implementados: chequeo (función **check**), alfa equivalencia de fórmulas y sustitución sin capturas.

En el **Capítulo 3 (El lenguaje PPA)** introducimos el lenguaje desde el punto de vista de un usuario: cómo están compuestos los programas, cómo usar el pequeño demostrador (**by**) para facilitar la escritura de demostraciones, y una descripción exhaustiva de todos los

Fig. 1.1: Arquitectura funcional de `ppa`

comandos soportados. En [Capítulo 4 \(El certificador de PPA\)](#) se muestra la implementación interna del *certificador* de PPA, cómo se generan demostraciones en deducción natural a partir de programas (la función `certify`). De forma central se explica el funcionamiento del `by`, que es el corazón del certificador.

En el [Capítulo 5 \(Extracción de testigos de existenciales\)](#) se muestra el proceso completo de extracción de testigos, comenzando por la traducción de Friedman y luego la normalización de demostraciones intuicionistas (`translateFriedman` y `reduce`).

Finalmente, en el [Capítulo 6 \(La herramienta `ppa`\)](#) se detallan los pasos para instalar y usar la herramienta `ppa`, y se mencionan algunos detalles de implementación como la arquitectura del programa a nivel módulos y dependencias entre ellos, el compilador y el modelado de deducción natural.

2. DEDUCCIÓN NATURAL

Comencemos por las fundaciones: queremos armar un programa que permita escribir teoremas y demostraciones, pero, ¿cómo se representa una demostración en la computadora? No alcanza con hacerlo de la misma forma que escribimos demostraciones en papel (como en el [Ejemplo 1](#)). Debe ser una representación más precisa.

En el área de estudio de *teoría de pruebas*, en la cuál las demostraciones son un objeto matemático formal que puede ser estudiado, aparecen los *sistemas de inferencia* o *deductivos*: sistemas lógicos formales que permiten demostrar sentencias. Nos son útiles pues pueden ser modelados como un tipo abstracto de datos, por lo que son representables en la computadora.

Por ejemplo, supongamos que tenemos la siguiente *teoría* sobre exámenes en la facultad, que iremos iterando a lo largo de la tesis. Por ahora, en su versión proposicional. Si un alumno reprueba un final, entonces recursa. Si un alumno falta, entonces reprueba. Con estas dos, podríamos demostrar que si un alumno falta a un final, entonces recursa. Veamos cómo podría ser una demostración en lenguaje natural.

Ejemplo 1. Si ((falta entonces reprueba) y (reprueba entonces recursa)) y falta, entonces recursa.

Demostración:

- Asumo que falta. Quiero ver que recursa.
- Sabemos que si falta, entonces reprueba. Por lo tanto reprobó.
- Sabemos que si reprueba, entonces recursa.
- Por lo tanto recursó. □

¿Cómo podrá ser formalizada en un *sistema de inferencia*?

2.1. El sistema de deducción natural

Los sistemas de inferencia en general están compuestos por

- **Lenguaje formal:** el conjunto L de fórmulas admitidas por el sistema. En nuestro caso, lógica de primer orden.
- **Reglas de inferencia:** lista de reglas que se usan para probar teoremas de axiomas y otros teoremas. Por ejemplo, *modus ponens* (si es cierto $A \rightarrow B$ y A , se puede concluir B) o *modus tollens* (si es cierto $A \rightarrow B$ y $\neg B$, se puede concluir $\neg A$)
- **Axiomas:** fórmulas de L que se asumen válidas. Todos los teoremas se derivan de axiomas. Por ejemplo, como usamos lógica clásica, vale el axioma *LEM* (Law of Excluded Middle): $A \vee \neg A$

El sistema particular que usamos se conoce como **deducción natural**, introducido por Gerhard Gentzen en [\[Gen35\]](#). Tiene dos tipos de *reglas de inferencia* para cada conectivo (\wedge , \vee , \exists , ...) y cuantificador (\forall , \exists), que nos permite razonar de dos formas distintas.

- **Regla de introducción:** ¿Cómo demuestro una fórmula formada por este conectivo?
- **Regla de eliminación:** ¿Cómo uso una fórmula formada por este conectivo para demostrar otra?

Por ejemplo, la regla $I\wedge$ nos va a permitir *introducir* una conjunción, demostrarla. EV *eliminar* una disyunción, usarla para demostrar otra fórmula. Primero vemos algunas definiciones preliminares, luego las reglas de inferencia, un ejemplo de una demostración, y finalmente explicamos cada regla en detalle.

Def. 4 (Contexto de demostración). Definimos,

- Los **contextos de demostración** Γ como un conjunto de fórmulas, compuesto por las hipótesis que se asumen a lo largo de una demostración.
- Por practicidad, notamos la unión como

$$\Gamma, \varphi = \Gamma \cup \{\varphi\}$$

- Para algunas reglas es necesario conocer las variables libres de un contexto, que se definen de la forma esperable:

$$fv(\Gamma) = \bigcup_{A \in \Gamma} fv(A)$$

Def. 5 (Relación de consecuencia). Las reglas de inferencia de la [Figura 2.1](#) definen la relación de consecuencia \vdash , que nos permite escribir *juicios* $\Gamma \vdash A$. Intuitivamente pueden ser interpretados como “ A es una consecuencia de las suposiciones de Γ ”

Más precisamente, el juicio será cierto si en una cantidad finita de pasos podemos, a partir de las fórmulas de Γ , los axiomas y las reglas de inferencia, concluir A . En ese caso decimos que A es *derivable* a partir de Γ .

Cuando el contexto es omitido, $\vdash A$ se usa como abreviación de $\emptyset \vdash A$.

Def. 6 (Sustitución). Notamos la **sustitución sin capturas** de todas las ocurrencias libres de la variable x por el término t en la fórmula A como

$$A\{x := t\}$$

Se explora en más detalle en la [Subsección 2.5.3 \(Sustitución sin capturas\)](#)

2.1.1. Reglas de inferencia

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma \vdash \perp}{\Gamma \vdash A} E\perp \qquad \frac{}{\Gamma \vdash \top} I\top \\
\frac{}{\Gamma \vdash A \vee \neg A} LEM \qquad \frac{}{\Gamma, A \vdash A} Ax \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A \wedge B}{\Gamma \vdash A} E\wedge_1 \qquad \frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I\wedge \qquad \frac{\Gamma \vdash A \wedge B}{\Gamma \vdash B} E\wedge_2 \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash A \vee B} I\vee_1 \qquad \frac{\Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \vee B} I\vee_2 \\
\frac{\Gamma \vdash A \vee B \quad \Gamma, A \vdash C \quad \Gamma, B \vdash C}{\Gamma \vdash C} E\vee \\
\\
\frac{\Gamma, A \vdash B}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} I\rightarrow \qquad \frac{\Gamma \vdash A \rightarrow B \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash B} E\rightarrow \\
\frac{\Gamma, A \vdash \perp}{\Gamma \vdash \neg A} I\neg \qquad \frac{\Gamma \vdash \neg A \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash \perp} E\neg \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A \quad x \notin fv(\Gamma)}{\Gamma \vdash \forall x.A} I\forall \qquad \frac{\Gamma \vdash \forall x.A}{\Gamma \vdash A\{x := t\}} E\forall \\
\\
\frac{\Gamma \vdash A\{x := t\}}{\Gamma \vdash \exists x.A} I\exists \\
\frac{\Gamma \vdash \exists x.A \quad \Gamma, A \vdash B \quad x \notin fv(\Gamma, B)}{\Gamma \vdash B} E\exists
\end{array}$$

Fig. 2.1: Reglas de inferencia para deducción natural de lógica clásica de primer orden

2.1.2. Ejemplo introductorio

Ejemplo 2. Demostración de **Ejemplo 1** en deducción natural. Lo modelamos para un solo alumno y materia, sin cuantificadores. Notamos

- $X \equiv \text{reprueba}(\text{juan}, \text{final}(\text{logica}))$
- $R \equiv \text{recursa}(\text{juan}, \text{logica})$
- $F \equiv \text{falta}(\text{juan}, \text{final}(\text{logica}))$

Queremos probar entonces

$$\left((X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X) \right) \rightarrow (F \rightarrow R)$$

$$\begin{array}{c}
\frac{\frac{\Gamma \vdash (X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X)}{\Gamma \vdash X \rightarrow R} \text{Ax} \quad \frac{\frac{\Gamma \vdash (X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X)}{\Gamma \vdash F \rightarrow X} \text{E}\wedge_2 \quad \frac{}{\Gamma \vdash F} \text{Ax}}{\Gamma \vdash X} \text{E}\rightarrow \\
\frac{\Gamma = (X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X), F \vdash R}{(X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X) \vdash F \rightarrow R} \text{I}\rightarrow \\
\frac{}{\vdash ((X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X)) \rightarrow (F \rightarrow R)} \text{I}\rightarrow
\end{array}$$

Fig. 2.2: Demostración de $((X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X)) \rightarrow (F \rightarrow R)$ en deducción natural

Las demostraciones en deducción natural son un árbol, en el que cada juicio está justificado por una regla de inferencia, que puede tener sub-árboles de demostración. La raíz es la fórmula a demostrar. Paso por paso,

- $\text{I}\rightarrow$: *introducimos* la implicación. Para demostrarla, asumimos el antecedente y en base a eso demostramos el consecuente. Es decir asumimos $(X \rightarrow R) \wedge (F \rightarrow X)$, y en base a eso queremos deducir $F \rightarrow R$.
- $\text{I}\rightarrow$: asumimos F , nos queda probar R . Nombramos el *contexto* de hipótesis como Γ .
- La estrategia para probar R es usando la siguiente cadena de implicaciones: $F \rightarrow X \rightarrow R$, y sabemos que vale F . Como tenemos que probar R , vamos de derecha a izquierda.
- $\text{E}\rightarrow$: *eliminamos* una implicación, la usamos para deducir su conclusión demostrando el antecedente. Esta regla de inferencia tiene dos partes, probar la implicación $(X \rightarrow R)$, y probar el antecedente (X) .
 - Para probar la implicación, tenemos que usar la hipótesis *eliminando* la conjunción y especificando cuál de las dos cláusulas estamos usando.
 - Para probar el antecedente X , es un proceso análogo pero usando la otra implicación y el hecho de que vale F por hipótesis.
- Las hojas del árbol, los casos base, suelen ser aplicaciones de la regla de inferencia Ax , que permite deducir fórmulas citando hipótesis del contexto.

2.2. Intuición detrás de las reglas

A continuación se explican brevemente las reglas de inferencia listadas en [Figura 2.1](#).

2.2.1. Reglas base

$$\begin{array}{cc}
\frac{\Gamma \vdash \perp}{\Gamma \vdash A} \text{E}\perp & \frac{}{\Gamma \vdash \top} \text{I}\top \\
\frac{}{\Gamma \vdash A \vee \neg A} \text{LEM} & \frac{}{\Gamma, A \vdash A} \text{Ax}
\end{array}$$

- $\text{E}\perp$: a partir de \perp , algo que es falso, vamos a poder deducir cualquier fórmula.
- $\text{I}\top$: \top trivialmente vale siempre

- LEM: el *principio del tercero excluido* que vale en lógica clásica. Incluir este axioma es lo que hace que este sistema sea clásico.
- Ax: como ya vimos en el [Ejemplo 2](#), lo usamos para deducir fórmulas que ya tenemos como hipótesis.

2.2.2. Reglas de conjunciones y disyunciones

$$\begin{array}{c}
 \frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I_{\wedge} \\
 \frac{\Gamma \vdash A \wedge B}{\Gamma \vdash A} E_{\wedge_1} \qquad \frac{\Gamma \vdash A \wedge B}{\Gamma \vdash B} E_{\wedge_2} \\
 \frac{\Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash A \vee B} I_{\vee_1} \qquad \frac{\Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \vee B} I_{\vee_2} \\
 \frac{\Gamma \vdash A \vee B \quad \Gamma, A \vdash C \quad \Gamma, B \vdash C}{\Gamma \vdash C} E_{\vee}
 \end{array}$$

- I_{\wedge} : para demostrar una conjunción, debemos demostrar ambas fórmulas.
- $E_{\wedge_1}/E_{\wedge_2}$: a partir de una conjunción podemos deducir cualquiera de las dos fórmulas que la componen, porque ambas valen. Se modela con dos reglas.
- I_{\vee_1}/I_{\vee_2} : para demostrar una disyunción, alcanza con demostrar una de sus dos fórmulas. Se modela con dos reglas al igual que la eliminación de conjunción.
- E_{\vee} : nos permite deducir una conclusión a partir de una disyunción dando sub demostraciones que muestran que sin importar cual de las dos valga, asumiéndolas por separado, se puede demostrar.

2.2.3. Reglas de implicación y negación

$$\begin{array}{c}
 \frac{\Gamma, A \vdash B}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} I_{\rightarrow} \qquad \frac{\Gamma \vdash A \rightarrow B \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash B} E_{\rightarrow} \\
 \frac{\Gamma, A \vdash \perp}{\Gamma \vdash \neg A} I_{\neg} \qquad \frac{\Gamma \vdash \neg A \quad \Gamma \vdash A}{\Gamma \vdash \perp} E_{\neg}
 \end{array}$$

- I_{\rightarrow} : para demostrar una implicación, asumimos el antecedente (agregándolo a las hipótesis) y en base a eso se demuestra el consecuente.
- E_{\rightarrow} : también conocida como *modus ponens*. A partir de una implicación, si podemos demostrar su antecedente, entonces vale su consecuente.
- I_{\neg} : para demostrar una negación, lo hacemos por el absurdo: asumimos que vale la fórmula y llegamos a una contradicción.
- E_{\neg} : podemos concluir un absurdo demostrando que vale una fórmula y su negación.

2.2.4. Reglas de cuantificadores

Las reglas de \forall y \exists se pueden ver como extensiones a las de \wedge y \vee . Un \forall se puede pensar como una conjunción con un elemento por cada uno del dominio sobre el cual se cuantifica, y análogamente un \exists como una disyunción.

$$\frac{\Gamma \vdash A \quad x \notin fv(\Gamma)}{\Gamma \vdash \forall x.A} \text{I}\forall \qquad \frac{\Gamma \vdash \forall x.A}{\Gamma \vdash A\{x := t\}} \text{E}\forall$$

- $\text{I}\forall$: para demostrar un $\forall x.A$, quiero ver que sin importar el valor que tome x yo puedo demostrar A . Pero para eso en el contexto Γ no tengo que tenerlo ligado a nada, sino no lo estaría demostrando en general.
- $\text{E}\forall$: para usar un $\forall x.A$ para demostrar, como vale para todo x , puedo instanciarlo en *cualquier término* t .

$$\frac{\Gamma \vdash A\{x := t\}}{\Gamma \vdash \exists x.A} \text{I}\exists$$

$$\frac{\Gamma \vdash \exists x.A \quad \Gamma, A \vdash B \quad x \notin fv(\Gamma, B)}{\Gamma \vdash B} \text{E}\exists$$

- $\text{I}\exists$: para demostrar un \exists , alcanza con instanciar x en un término t para el que sea cierto.
- $\text{E}\exists$: para usar un \exists para demostrar, es parecido a $\text{E}\forall$. Como tenemos que ver que vale para cualquier x , podemos concluir B tomando como hipótesis A con x sin instanciar.

Ejemplo 3. Para ejemplificar el uso de las reglas de cuantificadores, extendemos el **Ejemplo 2** para usar cuantificadores. Usamos

- Usamos las siguientes funciones 0-arias: a representa un alumno, m una materia y e un examen.
- $X(a, e) \equiv \text{reprueba}(a, e)$
- $R(a, m) \equiv \text{recursa}(a, m)$
- $F(a, e) \equiv \text{falta}(a, e)$

Vamos a tomar los siguientes como *axiomas*, que van a formar parte del contexto inicial de la demostración. Es lo mismo que haremos en PPA al modelar teorías de primer orden.

- **Axioma 1:** si un alumno reprueba el final de una materia, entonces recursa

$$\forall a. \forall m. (X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m))$$

- **Axioma 2:** si un alumno falta a un examen, lo reprueba

$$\forall a. \forall e. (F(a, e) \rightarrow X(a, e))$$

Definimos

$$\Gamma_0 = \{\forall a. \forall m. X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m), \forall a. \forall e. F(a, e) \rightarrow X(a, e)\}$$

Luego, queremos probar $\Gamma_0 \vdash \forall a. \forall m. F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)$

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma_1 \vdash \forall a \forall m. X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)}{\Gamma_1 \vdash \forall m. X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)} \text{Ax} \\
\frac{\Gamma_1 \vdash \forall m. X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)}{\Gamma_1 \vdash X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)} \text{E}\forall \\
\frac{\Gamma_1 \vdash X(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m) \quad \Gamma_1 \vdash X(a, \text{final}(m))}{\Gamma_1 = \Gamma_0, F(a, \text{final}(m)) \vdash R(a, m)} \text{E}\rightarrow \\
\frac{\Gamma_1 = \Gamma_0, F(a, \text{final}(m)) \vdash R(a, m)}{\Gamma_0 \vdash F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)} \text{I}\rightarrow \\
\frac{\Gamma_0 \vdash F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)}{\Gamma_0 \vdash \forall m. F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)} \text{I}\forall \\
\frac{\Gamma_0 \vdash \forall m. F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)}{\Gamma_0 \vdash \forall a. \forall m. F(a, \text{final}(m)) \rightarrow R(a, m)} \text{I}\forall
\end{array}$$

Con

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma_1 \vdash \forall a. \forall e. F(a, e) \rightarrow X(a, e)}{\Gamma_1 \vdash \forall e. F(a, e) \rightarrow X(a, e)} \text{Ax} \\
\frac{\Gamma_1 \vdash \forall e. F(a, e) \rightarrow X(a, e)}{\Gamma_1 \vdash F(a, \text{final}(m)) \rightarrow X(a, \text{final}(m))} \text{E}\forall \\
\frac{\Gamma_1 \vdash F(a, \text{final}(m)) \rightarrow X(a, \text{final}(m)) \quad \Gamma_1 \vdash F(a, \text{final}(m))}{\Gamma_1 \vdash X(a, \text{final}(m))} \text{E}\rightarrow
\end{array}$$

Fig. 2.3: Demostración con cuantificadores en deducción natural

2.3. Ajustes para generación de demostraciones

PPA genera demostraciones en deducción natural, pero no usa exactamente el sistema descrito en la [Figura 2.1](#), sino que tiene algunos ajustes.

2.3.1. Hipótesis etiquetadas

Sección re-redactada!

En las secciones anteriores presentamos a los contextos Γ como *conjuntos* de fórmulas. Pero en realidad vamos a querer que las hipótesis estén nombradas para proveer mayor claridad en las demostraciones. Para permitirlo, cada regla que introduce una hipótesis tiene que darle nombre, y cada regla que la usa, tiene que explicitar qué nombre tiene.

- Los contextos Γ se redefinen como conjuntos de *pares* $h : A$ de etiquetas y fórmulas.
- Las reglas que hacen uso de hipótesis, lo hacen nombrándolas.

$$\begin{array}{c}
\frac{h : A \in \Gamma}{\Gamma \vdash A} \text{Ax}_h \quad \frac{\Gamma, h : A \vdash B}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} \text{I}\rightarrow_h \quad \frac{\Gamma, h : A \vdash \perp}{\Gamma \vdash \neg A} \text{I}\neg_h \\
\frac{\Gamma \vdash A \vee B \quad \Gamma, h_1 : A \vdash C \quad \Gamma, h_2 : B \vdash C}{\Gamma \vdash C} \text{E}\vee_{(h_1, h_2)} \\
\frac{\Gamma \vdash \exists x. A \quad \Gamma, h : A \vdash B \quad x \notin \text{fv}(\Gamma, B)}{\Gamma \vdash B} \text{E}\exists_h
\end{array}$$

Notación. Como abuso de notación, nos vamos a permitir la libertad de usar ambas versiones a lo largo del documento. En casos en donde no sea relevante usar etiquetas, no las usaremos, y en los casos en donde sí lo haremos explícitamente.

Obs. Las reglas están decoradas con el nombre de la hipótesis porque esto hace que según cual se use, el uso de la regla y por lo tanto la demostración sea diferente. Por lo que si por ejemplo demostramos $A \rightarrow A \rightarrow A$, con etiquetas hay dos demostraciones distintas (dependiendo de si se usa la primera o segunda asunción) y sin habría una sola (como el contexto es un conjunto, se combinan ambas hipótesis en una).

2.3.2. Variables libres en contexto

Re-redactado!

Las reglas \forall y \exists validan que la variable del cuantificador no esté libre en el contexto. Cuando sí aparece, el algoritmo de chequeo debe reportar un error. El usuario debería re-escribir la demostración para corregir el uso de variables evitando conflictos.

Pero esto representó un problema para la generación de demostraciones, pues se daban conflictos en casos inofensivos: si tenemos una demostración de un teorema que usa las variables x, y , y lo citamos en otro que también las usa, el conflicto sería accidental, no estamos queriendo razonar de forma inválida. Al chequear la demostración citada, ya se usaron las variables en el anterior, llevando a un error. Para evitarlo manteniendo las reglas como están, habría que renombrar con cuidado las variables de forma automática.

La reformulamos para evitarlo de una forma más simple: en lugar de validar que la variable no esté no esté, directamente se remueve del contexto todas las hipótesis que contengan libre esa variable en la sub-demostración. Cada sub-demostración tiene un contexto “limpio”. Esto permite que si el conflicto era accidental, la demostración siga chequeando (porque no se usaban las hipótesis que generaban conflicto). Pero si se usaban, seguiría fallando pero con un error diferente (hipótesis inexistente).

Definimos

$$\Gamma \ominus x = \{A \in \Gamma \mid x \notin fv(A)\}$$

Luego, las reglas son re-definidas como

$$\frac{\Gamma \ominus x \vdash A}{\Gamma \vdash \forall x.A} \forall$$

$$\frac{\Gamma \ominus x \vdash \exists x.A \quad \Gamma \ominus x, h : A \vdash B \quad x \notin fv(B)}{\Gamma \vdash B} \exists_h$$

(NOTA: Lo re-redacté para dar un argumento un poco más robusto, si hace falta demostrar la inter-derivabilidad me decís y lo charlamos.)

2.4. Reglas admisibles

Antes mencionamos *modus tollens* como regla de inferencia, pero no aparece en la **Figura 2.1**. Esto es porque nos va a interesar tener un sistema lógico minimal: no vamos a agregar reglas de inferencia que se puedan deducir a partir de otras, es decir, *reglas admisibles*. Nos va a servir para simplificar el resto de PPA, dado que vamos a generar demostraciones en deducción natural y operar sobre ellas. Mientras más sencillas sean las partes con las que se componen, mejor. Las reglas admisibles las podemos demostrar para cualquier fórmula, así luego podemos usarlas como *macros*.

Ejemplo 4 (*Modus tollens*). Se puede demostrar como regla admisible.

$$\begin{array}{c}
\frac{}{\Gamma \vdash (A \rightarrow B) \wedge \neg B} \text{Ax} \quad \frac{}{\Gamma \vdash (A \rightarrow B) \wedge \neg B} \text{Ax} \quad \frac{}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} \text{E}\wedge_1 \quad \frac{}{\Gamma \vdash A} \text{Ax} \\
\frac{}{\Gamma \vdash \neg B} \text{E}\wedge_2 \quad \frac{}{\Gamma \vdash B} \text{E}\neg \quad \frac{}{\Gamma \vdash A} \text{Ax} \\
\frac{}{\Gamma \vdash (A \rightarrow B) \wedge \neg B, A \vdash \perp} \text{I}\neg \quad \frac{}{(A \rightarrow B) \wedge \neg B \vdash \neg A} \text{I}\neg \\
\frac{}{\vdash (A \rightarrow B \wedge \neg B) \rightarrow \neg A} \text{I}\rightarrow
\end{array}$$

2.5. Algoritmos

A continuación describimos los algoritmos que son necesarios para la implementación de deducción natural. El chequeo de las demostraciones, alfa equivalencia de fórmulas, sustitución sin capturas, y variables libres

2.5.1. Chequeador

Sección reescrita!

El algoritmo de chequeo de una demostración en deducción natural consiste en recorrer recursivamente el árbol de demostración, asegurando que todas las inferencias sean válidas y manteniendo un contexto Γ en el camino. Se chequea que cada regla se use con el conectivo que le corresponde (no un $\text{I}\wedge$ para un \vee) y que cumple con las condiciones impuestas.

El módulo que se encarga de implementarlo es el **ND.Checker**, su función principal es

```
check :: Env -> Proof -> Form
```

donde **Env** es el contexto Γ , **Proof** es el término de demostración en deducción natural y **Form** es la fórmula que demuestra.

2.5.2. Alfa equivalencia

Si tenemos una hipótesis $\exists x.f(x)$, sería ideal poder usarla para demostrar a partir de ella una fórmula $\exists y.f(y)$. Si bien no son exactamente iguales, son **alfa-equivalentes**: su estructura es la misma, pero tienen nombres diferentes para variables *ligadas* (no libres)

Def. 7 (Alfa equivalencia). Se define la relación $\overset{\alpha}{\equiv}$ como la que permite renombrar variables ligadas evitando capturas. Es la congruencia más chica que cumple con

$$\begin{aligned}
(\forall x.A) &\overset{\alpha}{\equiv} (\forall y.A') \iff A\{x := z\} \overset{\alpha}{\equiv} A'\{y := z\} \text{ con } z \text{ fresca} \\
(\exists x.A) &\overset{\alpha}{\equiv} (\exists y.A') \iff A\{x := z\} \overset{\alpha}{\equiv} A'\{y := z\} \text{ con } z \text{ fresca}
\end{aligned}$$

Para implementarlo, un algoritmo naíf podría ser cuadrático: chequeamos recursivamente la igualdad estructural de ambas fórmulas. Si nos encontramos con un cuantificador con variables con nombres distintos, digamos x y y , elegimos una nueva variable *fresca* (para evitar capturas) y lo renombramos recursivamente en ambos. Luego continuamos con el algoritmo. Si en la base nos encontramos con dos variables, tienen que ser iguales.

Para hacerlo un poco más eficiente, se implementó un algoritmo lineal en la estructura de la fórmula. Mantenemos dos sustituciones de variables, una para cada fórmula. Si nos encontramos con $\exists x.f(x)$ y $\exists y.f(y)$, vamos a elegir una variable fresca igual que antes (por

ejemplo z), pero en vez de renombrar recursivamente, que lo hace cuadrático, insertamos en cada sustitución los renombres $x \mapsto z$ y $y \mapsto z$. Luego, cuando estemos comparando dos variables libres, chequeamos que *sus renombres* sean iguales. En este ejemplo son alfa equivalentes, pues

$$\begin{aligned} (\exists x.f(x)) \stackrel{\alpha}{=} (\exists y.f(y)) &\iff f(x) \stackrel{\alpha}{=} f(y) && \{x \mapsto z\}, \{y \mapsto z\} \\ &\iff x \stackrel{\alpha}{=} y && \{x \mapsto z\}, \{y \mapsto z\} \\ &\iff z = z. \end{aligned}$$

2.5.3. Sustitución sin capturas

Notamos la sustitución de todas las ocurrencias libres de la variable x por un término t en una fórmula A como $A\{x := t\}$. Esto se usa en algunas reglas de inferencia,

$$\frac{\Gamma \vdash \forall x.A}{\Gamma \vdash A\{x := t\}} \text{E}\forall$$

Pero queremos evitar **captura de variables**. Por ejemplo, en

$$\forall y.p(x)\{x := y\},$$

si sustituimos sin más, estaríamos involuntariamente “capturando” a y . Si hiciéramos que falle, tener que escribir las demostraciones con estos cuidados puede ser muy frágil y propenso a errores, por lo que es deseable que se resuelva *automáticamente*: cuando nos encontramos con una captura, sustituimos la variable ligada de forma que no ocurra.

$$\forall y.p(x)\{x := y\} = \forall z.p(y)$$

donde z es una variable *fresca*.

Def. 8 (Sustitución sin capturas). **Corregido!** Se define por inducción estructural.

■ Términos

$$\begin{aligned} x\{y := t\} &= \begin{cases} t & \text{si } x = y \\ x & \text{si no} \end{cases} \\ f(t_1, \dots, t_n)\{y := t\} &= f(t_1\{y := t\}, \dots, t_n\{y := t\}) \end{aligned}$$

■ Fórmulas

$$\begin{aligned}
& \perp\{y := t\} = \perp \\
& \top\{y := t\} = \top \\
& p(t_1, \dots, t_n)\{y := t\} = p(t_1\{y := t\}, \dots, t_n\{y := t\}) \\
& (A \wedge B)\{y := t\} = A\{y := t\} \wedge B\{y := t\} \\
& (A \vee B)\{y := t\} = A\{y := t\} \vee B\{y := t\} \\
& (A \rightarrow B)\{y := t\} = A\{y := t\} \rightarrow B\{y := t\} \\
& (\neg A)\{y := t\} = \neg A\{y := t\} \\
& (\forall x.A)\{y := t\} = \begin{cases} \forall x.A & \text{si } x = y \\ \forall z.(A\{x := z\})\{y := t\} & \text{si } x \in fv(t), \text{ con } z \text{ fresca} \\ \forall x.A\{y := t\} & \text{si no} \end{cases} \\
& (\exists x.A)\{y := t\} = \begin{cases} \exists x.A & \text{si } x = y \\ \exists z.(A\{x := z\})\{y := t\} & \text{si } x \in fv(t), \text{ con } z \text{ fresca} \\ \exists x.A\{y := t\} & \text{si no} \end{cases}
\end{aligned}$$

Para implementarlo, cada vez que nos encontramos con una captura, vamos a *renombrar* la variable del cuantificador por una nueva, fresca. Al igual que la alfa igualdad, esto se puede implementar de forma naïf cuadrática pero lo hicimos lineal. Mantenemos un único mapeo a lo largo de la sustitución, y cada vez que nos encontramos con una variable libre, si son iguales la sustituimos por el término, y si está mapeada la renombramos.

Def. 9 (Variables libres de una demostración). Sea Π una demostración. $fv(\Pi)$ son las variables libres de todas las fórmulas que la componen. Por ejemplo, para la siguiente

$$\frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I_{\wedge}$$

se tiene $fv(\Pi) = fv(A) \cup fv(B)$

3. EL LENGUAJE PPA

El lenguaje PPA (*Pani's Proof Assistant*) se construye sobre las fundaciones de deducción natural. Es un asistente de demostración que permite escribir de una forma práctica demostraciones de cualquier teoría de lógica clásica de primer orden. En este capítulo nos vamos a centrar en el lenguaje PPA, la interfaz del programa `ppa`, vista desde el punto de vista de un usuario que busca escribir demostraciones. Los detalles teóricos de cómo está implementado son abordados en el [Capítulo 4](#), y los de implementación y su instalación en el [Capítulo 6](#). Para introducirlo veamos un ejemplo: en la [Figura 3.1](#) representamos el mismo de alumnos del [Ejemplo 3](#) pero con un poco más de sofisticación.

Diseccionemos parte por parte. La primera de todo programa en PPA es definir los axiomas de la *teoría de primer orden* con la que se está trabajando. Como no se chequean tipos, no es necesario definir explícitamente los símbolos de predicados y de función. Pero se pueden agregar a modo informativo como un comentario. Consisten en fórmulas que son siempre consideradas como válidas. Definimos,

- **axiom** `reprueba_recu_parcial_recura`: si un alumno reprueba el parcial y el recuperatorio de una materia, la recusa.
- **axiom** `reprobo_rinde`: si un alumno reprobó un examen, es porque lo rindió.
- **axiom** `rinde_recu_reprobo_parcial`: si un alumno rinde el recu de un parcial, es porque reprobó la primer instancia.
- **axiom** `falta_reprueba`: si un alumno falta a un exámen, lo reprueba.

```

1  /* Teoría de alumnos y exámenes
2
3  Predicados
4      - reprueba(A, P): El alumno A reprueba el parcial P
5      - recusa(A, M): El alumno A recusa la materia M
6
7  Funciones
8      - parcial(M): El parcial de una materia
9      - recu(P): El recuperatorio de un parcial
10 */
11
12 axiom reprueba_recu_parcial_recura: forall A. forall M.
13     (reprueba(A, parcial(M)) & reprueba(A, recu(parcial(M))))
14     -> recusa(A, M)
15
16 axiom rinde_recu_reprobo_parcial: forall A. forall P.
17     rinde(A, recu(P)) -> reprueba(A, P)
18
19 axiom reprobo_rinde: forall A. forall P.
20     reprueba(A, P) -> rinde(A, P)
21
22 axiom falta_reprueba: forall A. forall P.
23     falta(A, P) -> reprueba(A, P)

```

En base a eso demostramos dos teoremas. El primero, **theorem** `reprueba_recu_recura`, nos permite concluir que un alumno recusa solo a partir de que reprueba el recuperatorio. Esto es porque a partir de esto, con el resto de los axiomas, podemos deducir que también reprobó el parcial: si reprueba el recuperatorio es porque lo rindió, y si rindió el recuperatorio, es porque reprobó el parcial.

```

1  axiom reprueba_recu_parcial_recura: forall A. forall M.
2    (reprueba(A, parcial(M)) & reprueba(A, recu(parcial(M))))
3    -> recursa(A, M)
4
5  axiom rinde_recu_reprobo_parcial: forall A. forall P.
6    rinde(A, recu(P)) -> reprueba(A, P)
7
8  axiom reprobo_rinde: forall A. forall P.
9    reprueba(A, P) -> rinde(A, P)
10
11 axiom falta_reprueba: forall A. forall P.
12   falta(A, P) -> reprueba(A, P)
13
14 theorem reprueba_recu_recura:
15   forall A. forall M.
16     reprueba(A, recu(parcial(M))) -> recursa(A, M)
17 proof
18   let A
19   let M
20   suppose reprueba_recu: reprueba(A, recu(parcial(M)))
21
22   claim reprueba_p: reprueba(A, parcial(M))
23   proof
24     have rinde_recu: rinde(A, recu(parcial(M)))
25     by reprueba_recu, reprobo_rinde
26
27     hence reprueba(A, parcial(M))
28     by rinde_recu_reprobo_parcial
29   end
30
31   hence recursa(A, M)
32   by reprueba_recu,
33     reprueba_p,
34     reprueba_recu_parcial_recura
35 end
36
37 theorem falta_recu_recura:
38   forall A. forall M.
39     falta(A, recu(parcial(M))) -> recursa(A, M)
40 proof
41   let A
42   let M
43
44   suppose falta_recu: falta(A, recu(parcial(M)))
45
46   have reprueba_recu: reprueba(A, recu(parcial(M)))
47   by falta_recu, falta_reprueba
48
49   hence recursa(A, M) by reprueba_recu_recura
50 end

```

Fig. 3.1: Programa de ejemplo completo en PPA. Demostraciones de alumnos y parciales.

```

24 theorem reprueba_recu_recura:
25   forall A. forall M.
26     reprueba(A, recu(parcial(M))) -> recursa(A, M)
27 proof
28   let A
29   let M
30   suppose reprueba_recu: reprueba(A, recu(parcial(M)))
31
32   claim reprueba_p: reprueba(A, parcial(M))
33   proof
34     have rinde_recu: rinde(A, recu(parcial(M)))
35     by reprueba_recu, reprobo_rinde
36
37     hence reprueba(A, parcial(M))
38     by rinde_recu_reprobo_parcial
39   end
40
41   hence recursa(A, M)
42   by reprueba_recu,
43     reprueba_p,
44     reprueba_recu_parcial_recura
45 end

```

Para demostrar un teorema, tenemos que agotar su *tesis* reduciéndola sucesivamente con *proof steps*. Una demostración es correcta si todos los pasos son lógicamente correctos, y luego de ejecutarlos todos, la tesis se reduce por completo.

- **let** permite demostrar un **forall**, asignando un nombre a la variable general, y *reduce* la tesis a su fórmula.
- **suppose** permite demostrar una implicación. Agrega como hipótesis al contexto el antecedente, permitiendo nombrarlo, y reduce la tesis al consecuente.
- **claim** permite agregar una sub-demostración, cuya fórmula se agrega como hipótesis.
- **have** agrega una hipótesis auxiliar, sin reducir la tesis.
- **by** es el mecanismo principal de demostración. Permite deducir fórmulas a partir de otras. Es completo para lógica proposicional, y heurístico para primer orden. Unifica las variables de los **forall**.
- **thus** permite reducir parte o la totalidad de la tesis.
- **hence** es igual a **thus**, pero incluye implícitamente la hipótesis anterior a las justificaciones del **by**.

Finalmente, a partir del teorema anterior y **axiom** *falta_reprueba* podemos demostrar que si un alumno falta a un recuperatorio, recursa la materia.

```

46 theorem falta_recu_recura:
47   forall A. forall M.
48     falta(A, recu(parcial(M))) -> recusa(A, M)
49 proof
50   let A
51   let M
52
53   suppose falta_recu: falta(A, recu(parcial(M)))
54
55   have reprueba_recu: reprueba(A, recu(parcial(M)))
56     by falta_recu, falta_reprueba
57
58   hence recusa(A, M) by reprueba_recu_recura
59 end

```

Al ejecutarlo con **ppa**, se *certifica* la demostración, generando un certificado de deducción natural, y luego se chequea que sea correcto. Si se escribió una demostración que no es lógicamente válida, el certificador reporta el error. No debería fallar nunca el chequeo sobre el certificado.

3.1. Interfaz

PPA es un lenguaje que permite escribir demostraciones de cualquier teoría de lógica de primer orden. Está inspirado en el *mathematical vernacular* introducido por Freek Wiedijk [Wie]. En esta sección nos concentramos en la interfaz de usuario, sin entrar en detalle en cómo está implementada.

Un programa de PPA consiste en una lista de **declaraciones**: axiomas y teoremas, que se leen en orden el inicio hasta el final.

- Los axiomas se asumen válidos, se usan para modelar la *teoría de primer orden* sobre la cual hacer demostraciones

axiom <name> : <form>

- Los teoremas deben ser demostrados, y se pueden citar todas las hipótesis previas, que consideran ciertas.

theorem <name> : <form>

proof

<steps>

end

3.1.1. Identificadores

Los identificadores se dividen en tres tipos:

- **Variables** (<var>). Son descritas por la siguiente expresión regular

$$(\backslash_|[A-Z])[a-zA-Z0-9\backslash_]*\backslash'*)^*$$

- **Identificadores** (<id>). Son descritos por la siguiente expresión regular

$$[a-zA-Z0-9_\\-\\?\\!\\#\\\$\\%*\\+\\<\\>\\=\\?\\@\\^\\`]+(\\ ')*$$

- **Nombres** (<name>): pueden ser identificadores, o *strings* arbitrarios encerrados por comillas dobles ("..."), que son descritos por la siguiente expresión regular

$$\\ "[^\\"]*" \\ "$$

3.1.2. Comentarios

Se pueden escribir comentarios de una sola línea (*// ...*) o multilínea (*/* ... */*)

3.1.3. Fórmulas

Las fórmulas están compuestas por,

- **Términos**
 - **Variables:** <var>. Ejemplos: *_x*, *X*, *X'''*, *Alumno*.
 - **Funciones:** <id>(<term>, ..., <term>). Los argumentos son opcionales, pudiendo tener funciones 0-arias (constantes). Ejemplos: *c*, *f*(*_x*, *c*, *X*).
- **Predicados:** <id>(<term>, ..., <term>). Los argumentos son opcionales, pudiendo tener predicados 0-arios (variables proposicionales). Ejemplos: *p*(*c*, *f*(*w*), *X*), *A*, <(n, m)>
- **Conectivos binarios.**
 - <form> & <form> (conjunción)
 - <form> | <form> (disyunción)
 - <form> -> <form> (implicación)
- **Negación** ~<form>
- **Cuantificadores**
 - **exists** <var> . <form>
 - **forall** <var> . <form>
- **true, false**
- **Paréntesis:** (<form>)

3.2. Demostraciones

Las demostraciones consisten en una lista de *proof steps* o comandos que pueden reducir sucesivamente la *tesis* (fórmula a demostrar) hasta agotarla por completo. Corresponden aproximadamente a reglas de inferencia de deducción natural.

3.2.1. Contexto

Las demostraciones llevan asociado un *contexto* con todas las hipótesis que fueron asumidas (como los axiomas), o demostradas: tanto teoremas anteriores como sub-teoremas y otros comandos que agregan hipótesis a él.

3.2.2. **by** - el mecanismo principal de demostración

El mecanismo principal de demostración directa o *modus ponens* es el **by**, que afirma que un hecho es consecuencia de una lista de hipótesis (su “justificación”). Esto permite eliminar universales e implicaciones. Por detrás hay un solver completo para lógica proposicional pero heurístico para primer orden (elimina todos los forall de a lo sumo una hipótesis, no intenta con más de una). Exploramos las limitaciones en [Subsección 4.4.6 \(Poder expresivo\)](#).

En general, `<form> by <justification>` se interpreta como que `<form>` es una consecuencia lógica de las fórmulas que corresponden a las hipótesis de `<justification>`, que deben estar declaradas anteriormente y ser parte del contexto. Ya sea por axiomas o teoremas, u otros comandos que agreguen hipótesis (como **suppose**). Puede usarse de dos formas principales, **thus** y **have**

■ **thus** `<form> by <justification>`.

Si `<form>` es *parte* de la tesis (ver [Subsección 3.2.4 \(Descarga de conjunciones\)](#)), y es consecuencia lógica de las justificaciones, lo demuestra automáticamente y lo descarga de la tesis.

Por ejemplo, para eliminación de implicaciones

```

1 axiom ax1: a -> b
2 axiom ax2: b -> c
3
4 theorem t1: a -> c
5 proof
6   suppose a: a
7
8   // La tesis ahora es c
9   thus c by a, ax1, ax2
10 end
```

Y para eliminación de cuantificadores universales

```

1 axiom ax: forall X . f(X)
2
3 theorem t: f(n)
4 proof
5   thus f(n) by ax
6 end
```

■ **have** `<form> by <justification>`.

Igual a **thus**, pero permite introducir afirmaciones *auxiliares* que no son parte de la tesis, sin reducirla, y las agrega a las hipótesis para usar luego. Por ejemplo, la demostración anterior la hicimos en un solo paso con el **thus**, pero podríamos haberla hecho en más de uno con una afirmación auxiliar intermedia.

```

1 axiom ax1: a -> b
2 axiom ax2: b -> c
3
4 theorem t1: a -> c
5 proof
6   suppose a: a
7   have b: b by a, ax1
8   thus c by b, ax2
9 end

```

Ambas tienen su contraparte con *azúcar sintáctico* que agrega automáticamente la hipótesis anterior a la justificación, a la que también se puede referir con guión medio (-).

Comando	Alternativo	¿Reduce la tesis?
thus	hence	Si
have	then	No

Por ejemplo,

<pre> 1 axiom ax1: a -> b 2 axiom ax2: b -> c 3 4 theorem t1: a -> c 5 proof 6 suppose a: a 7 have b: b by a, ax1 8 thus c by b, ax2 9 end </pre>	<pre> 10 theorem t1': a -> c 11 proof 12 suppose a: a 13 have b: b by -, ax1 14 thus c by -, ax2 15 end 16 17 theorem t1'': a -> c 18 proof 19 suppose -: a 20 then -: b by ax1 21 hence c by ax2 22 end </pre>
--	---

En todos, el **by** es opcional. En caso de no especificarlo, debe ser una tautología.

```

1 theorem "distributiva de negación sobre disyunción":
2   ~(a | b) <-> ~a & ~b
3 proof
4   thus ~(a | b) <-> ~a & ~b
5 end

```

3.2.3. Comandos y reglas de inferencia

Muchas reglas de inferencia de deducción natural (2.1) tienen una correspondencia directa con comandos. Como se puede ver en [Tabla 3.1 \(Reglas de inferencia y comandos\)](#), la mayor parte del trabajo manual, detallista y de bajo nivel de escribir demostraciones en deducción natural resuelve automáticamente con el uso **by**.

Regla	Comando
$I\exists$	take
$E\exists$	consider
$I\forall$	let
$E\forall$	by
$I\forall_1$	by
$I\forall_2$	by
$E\forall$	cases
$I\wedge$	by
$E\wedge_1$	by
$E\wedge_2$	by
$I\rightarrow$	suppose
$E\rightarrow$	by
$I\neg$	suppose
$E\neg$	by
IT	by
$E\perp$	by
LEM	by
Ax	by

Tab. 3.1: Reglas de inferencia y comandos

■ **suppose** ($I\rightarrow$ / $I\neg$)

Si la tesis es una implicación $A \rightarrow B$, agrega el antecedente A como hipótesis con el nombre dado y reduce la tesis al consecuente B . Viendo la negación como una implicación $\neg A \equiv A \rightarrow \perp$, se puede usar para introducir negaciones, tomando $B = \perp$.

```

1 theorem "suppose":
2   a -> (a -> b) -> b
3 proof
4   suppose h1: a
5   suppose h2: a -> b
6   thus b by h1, h2
7 end
```

```

1 theorem "not intro":
2   ~b & (a -> b) -> ~a
3 proof
4   suppose h: ~b & (a -> b)
5   suppose a: a
6   hence false by h, a
7 end
```

■ **cases** ($E\forall$)

Permite razonar por casos. Para cada uno se debe demostrar la tesis en su totalidad por separado.

```

1 theorem "cases":
2   (a & b) | (c & a) -> a
3 proof
4   suppose h: (a & b) | (c & a)
5   cases by h
6     case a & b
7       hence a
8     case right: a & c
9       thus a by right
```



```

10   end
11 end

```

No es necesario que los casos sean exactamente iguales a como están presentados en la hipótesis, solo debe valer que la disyunción de ellos sea consecuencia de ella. Es decir, para poder usar

```

cases by h1, ..., hn
  case c1
  ...
  case cm
end

```

Tiene que valer $c1 \mid \dots \mid cm$ **by** $h1, \dots, hn$.

Por lo que en el ejemplo anterior, podríamos haber usado el mismo **case** incluso si la hipótesis fuera $\sim((\sim a \mid \sim b) \ \& \ (\sim c \mid \sim a))$, pues es equivalente a $(a \ \& \ b) \mid (c \ \& \ a)$.

■ **take** (\exists)

Introduce un existencial instanciando su variable y reemplazándola por un término. Si la tesis es **exists** X . $p(X)$, luego de **take** $X := a$, se reduce a $p(a)$.

■ **consider** (\exists)

Permite razonar sobre una variable que cumpla con un existencial. Si se puede justificar **exists** X . $p(X)$, permite razonar sobre X .

El comando **consider** X **st** h : p **by** ... agrega p como hipótesis al contexto para el resto de la demostración. El **by** debe justificar **exists** X . $p(X)$.

Valida que X no esté libre en la tesis.

También es posible usar una fórmula α -equivalente, por ejemplo si podemos justificar **exists** X . $p(X)$, podemos usarlo para **consider** Y **st** h : $p(Y)$ **by** ...

■ **let** (\forall)

Permite demostrar un cuantificador universal. Si se tiene **forall** X . $p(X)$, luego de **let** X la tesis se reduce a $p(X)$ con un X genérico. Puede ser el mismo nombre de variable o uno diferente.

3.2.4. Descarga de conjunciones

Si la tesis es una conjunción, se puede probar solo una parte de ella y se reduce al resto.

Fig. 3.2: Descarga de conjunción simple

```

1  theorem "and discharge" : a -> b -> (a & b)
2  proof
3    suppose "a" : a
4    suppose "b" : b
5    // La tesis es a & b
6    hence b by "b"
7
8    // La tesis es a
9    thus a by "a"
10 end

```

Esto puede ser prácticamente en cualquier orden.

Fig. 3.3: Descarga de conjunción compleja

```

1  axiom "a": a
2  axiom "b": b
3  axiom "c": c
4  axiom "d": d
5  axiom "e": e
6  theorem "and discharge" : (a & b) & ((c & d) & e)
7  proof
8      thus a & e by "a", "e"
9      thus d by "d"
10     thus b & c by "b", "c"
11 end

```

3.2.5. Otros comandos

- **equivalently**: permite reducir la tesis a una fórmula equivalente. Útil para usar descarga de conjunciones.

```

1  axiom a1: ~a
2  axiom a2: ~b
3
4  theorem "ejemplo" : ~(a | b)
5  proof
6      equivalently ~a & ~b
7      thus ~a by a1
8      thus ~b by a2
9  end

```

- **claim**: permite demostrar una afirmación auxiliar. Útil para ordenar las demostraciones sin tener que definir otro teorema. Ejemplo en [Figura 3.1 \(Programa de ejemplo completo en PPA. Demostraciones de alumnos y parciales.\)](#)

```

theorem t: <form>
proof
  claim <name>: <form>
  proof
    <proof>
  end
end
end

```

4. EL CERTIFICADOR DE PPA

En la sección anterior vimos cómo usar PPA para demostrar teoremas. Pero, ¿cómo funciona por detrás? ¿Como asegura la validez lógica de las demostraciones escritas por el usuario?

4.1. Certificados

Los programas de PPA se **certifican**, generando un certificado: una demostración en deducción natural. ¿Por qué? El lenguaje es complejo, la implementación no es trivial. Si se programa una demostración, para confiar en que es correcta hay que confiar también en la implementación de PPA. Pero si generara una demostración de bajo nivel, que use las reglas de un sistema lógico simple y conocido, entonces cualquiera que desconfie podría fácilmente escribir un chequeador, o usar uno confiable. Decimos que un asistente de demostración que cuenta con esta propiedad deseable cumple con el **criterio de de Bruijn**. `ppa` lo cumple al generar demostraciones en deducción natural.

Def. 10 (Criterio de de Bruijn [BW05]). Un asistente de demostración que satisface que sus demostraciones puedan ser chequeadas por un programa independiente, pequeño y confiable se dice que cumple con el criterio de de Bruijn.

(DUDA: Para pablo: pero si emite certificados que no corresponden a la demo original y chequean siempre, por ej. siempre el mismo, no estaría mal igual? Tenés que confiar también en la parte que emite el certificado.)

El módulo de PPA que certifica las demostraciones de alto nivel de PPA generando una demostración en deducción natural es el `PPA.Certifier`. Si bien toda demostración que genere debería ser correcta, para atajar posibles errores siempre se chequean con el `ND.Checker`, el pequeño módulo que implementa el chequeo de los certificados.

4.2. Contextos

En realidad no se genera una sola demostración de deducción natural, sino que al poder haber más de un teorema en un programa de PPA, el certificado es un **contexto** compuesto por una lista ordenada de **hipótesis** de dos tipos:

- **Teoremas**: son fórmulas con demostraciones de deducción natural asociadas.
- **Axiomas**: son fórmulas que se asumen válidas (pueden ser usadas para modelar una teoría)

Se puede ver un ejemplo en la [Figura 4.1](#). Esto se puede ver en el tipo de la función principal del módulo: `certify :: Program -> Result Context`. Como para un programa generamos muchas demostraciones, debemos extender el chequeo a contextos: Cada demostración será válida en el *prefijo estricto del contexto* que la contiene. Es decir, a la hora de chequear la demostración de un teorema, se deben asumir como ciertas todas las hipótesis que fueron definidas antes que él. En el ejemplo, cuando chequeamos la demostración de `t1`, debemos asumir como válidos los axiomas `ax1`, `ax2`, `ax3`.

```

1 axiom ax1: q
2 axiom ax2: q -> p
3 axiom ax3: p -> r
4
5 theorem t1: p
6 proof
7   thus p by ax1, ax2
8 end
9
10 theorem t2: r
11 proof
12   thus r by t1, ax3
13 end

```

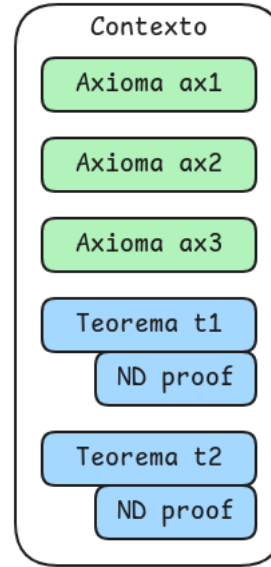


Fig. 4.1: Contexto resultante de certificar de un programa

4.2.1. Contexto local

Pero no solo los axiomas y teoremas declarados en el programa se agregan al contexto. Cada demostración de un teorema tendrá además un *contexto local* que extiende al anterior, solo válido durante el alcance de su demostración (se omiten en el certificado).

En él, las afirmaciones auxiliares que no afectan la tesis como **have**, **claim** y **consider**, etc. se agregan como teoremas. Por lo tanto, cuando se citen, se pueden copiar sus demostraciones tomándolas del contexto local. Por otro lado, algunos comandos agregan axiomas, los mismos que en deducción natural agregan fórmulas al contexto (**suppose** y **consider**). Es correcto asumir como ciertas esas hipótesis, porque lo mismo se hará durante el chequeo de la demostración generada de deducción natural. Se puede ver un ejemplo en la [Figura 4.2 \(Contexto local\)](#).

4.3. Certificado de demostraciones

Ya vimos cómo las hipótesis se agregan al contexto. Pero ¿cómo generamos una demostración de deducción natural a partir de una demostración de un teorema de PPA? Para cada comando introducido en el [Capítulo 3](#), deberemos *certificarlo* generando una demostración de deducción natural, con el resto del programa siendo una demostración de sus premisas. En la [Figura 4.3](#) se puede ver un ejemplo, en donde **take** se certifica como \exists , y la demostración de su premisa está dada por el certificado del resto del programa, **thus** $p(v)$ **by** ax , que se certifica como Ax .

```

1 axiom ax1: p -> q
2 theorem t: (q -> r) -> p -> r
3 proof
4   suppose h1: (q -> r)
5   suppose h2: p
6   then tq: q by ax1
7   hence r by h1
8 end

```

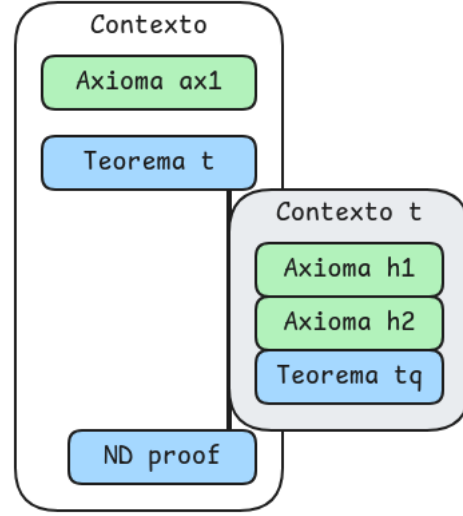


Fig. 4.2: Contexto local

```

1 axiom ax: p(v)
2 theorem t: exists X . p(X)
3 proof
4   take X := v
5   thus p(v) by ax
6 end

```

$$\frac{\overline{p(v) \vdash p(v)} \text{ Ax}}{p(v) \vdash \exists x.p(X)} \text{ I}\exists$$

Fig. 4.3: Ejemplo de certificado generado para un programa

En el resto del capítulo presentamos cómo cada comando de PPA puede ser traducido.

- Comenzamos con describir el *solver* que se usa por debajo del **by**, que es central al funcionamiento de todo el certificador. Aquí veremos que la demostración generada para 4.3 no es exactamente como se presenta.
- Vemos cómo podemos usarlo para facilitar la descarga de conjunciones en un orden arbitrario.
- También la traducción de los comandos que corresponden a reglas de inferencia de forma directa: **take** (I \exists), **consider** (E \exists), **let** (I \forall), **cases** (E \vee) y **suppose** (I \rightarrow , I \neg).
- Y finalmente los comandos adicionales: **equivalently** y **claim**.

4.4. Implementación del by

El **by** es el mecanismo principal de demostración en PPA, y el corazón del **PPA.Certifier**. Muchas funcionalidades están implementadas a su alrededor. Genera **automáticamente** una demostración de que una fórmula es consecuencia lógica de una lista de hipótesis. Es un *solver heurístico* para lógica de primer orden.

Sea A una fórmula. Supongamos que queremos demostrar **thus A by** h_1, \dots, h_n y que en el contexto tenemos que las hipótesis h_i corresponden a fórmulas B_i , con $i \in \{1, \dots, n\}$, $n \in \mathbb{N}$. Primero veamos la idea general de la estrategia y luego profundizamos en cada paso. Los pasos para certificar un **by** son los siguientes.

- Queremos demostrar la implicación de las hipótesis a la fórmula.

$$B_1 \wedge \dots \wedge B_n \rightarrow A$$

A esta fórmula la llamamos **tesis**.

- Razonamos por el absurdo: asumiendo la negación de la tesis encontramos una contradicción

$$\begin{aligned} \neg(B_1 \wedge \dots \wedge B_n \rightarrow A) &\equiv \neg(\neg(B_1 \wedge \dots \wedge B_n) \vee A) \\ &\equiv B_1 \wedge \dots \wedge B_n \wedge \neg A \end{aligned}$$

- Convertimos la negación de la tesis a forma normal disyuntiva (DNF), una disyunción de conjunciones de literales (“cláusulas”).

$$(a_1^1 \wedge \dots \wedge a_{n_1}^1) \vee \dots \vee (a_1^m \wedge \dots \wedge a_{n_m}^m)$$

donde $m \in \mathbb{N}$ es el número de cláusulas, $n_1, \dots, n_m \in \mathbb{N}$ es la cantidad de fórmulas de cada cláusula y a_j^i es la j -ésima fórmula de la i -ésima cláusula.

(DUDA: Me parece que me compliqué de más con esta notación. Estaría OK dejarlo como $(a_1 \wedge \dots \wedge a_n) \vee \dots \vee (b_1 \wedge \dots \wedge b_m)$?)

- Buscamos una contradicción refutando cada cláusula individualmente. Una cláusula $a_1 \wedge \dots \wedge a_n$ será refutable si cumple una de las siguientes condiciones.
 - Contiene \perp
 - Contiene dos fórmulas opuestas ($a, \neg a$)
 - Eliminando existenciales consecutivos y re-convirtiendo a DNF, se consigue una refutación ($\neg p(k), \forall x. p(x)$)

La complejidad del mecanismo no reside solo en tener que realizar todos estos pasos, sino que el desafío principal fue **generar la demostración en deducción natural**. Veamos un ejemplo sin generar la demostración, y sin eliminar existenciales.

Ejemplo 5 (Ejemplo sin cuantificadores). Tenemos el siguiente programa

```

1  axiom ax1: a -> b
2  axiom ax2: a
3  theorem t: b
4  proof
5      thus b by ax1, ax2
6  end

```

Para certificar **thus b by ax1, ax2** hay que generar una demostración para la implicación $((a \rightarrow b) \wedge a) \rightarrow b$.

1. Negamos la fórmula

$$\neg[(a \rightarrow b) \wedge a] \rightarrow b]$$

2. La convertimos a DNF

$$\begin{aligned} & \neg[(a \rightarrow b) \wedge a] \rightarrow b] \\ & \equiv \neg[\neg((a \rightarrow b) \wedge a) \vee b] & (A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B) \\ & \equiv \neg[\neg((a \rightarrow b) \wedge a) \wedge \neg b] & (\neg(A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B) \\ & \equiv ((a \rightarrow b) \wedge a) \wedge \neg b & (\neg\neg A \equiv A) \\ & \equiv (\neg a \vee b) \wedge a \wedge \neg b & (A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B) \\ & \equiv (\neg a \vee b) \wedge a \wedge \neg b & ((A \vee B) \wedge C \equiv (A \wedge C) \vee (B \wedge C)) \\ & \equiv (\neg a \wedge a \wedge \neg b) \vee (b \wedge a \wedge \neg b) \end{aligned}$$

3. Buscamos una contradicción refutando cada cláusula

- En $(\neg a \wedge a \wedge \neg b)$ tenemos $\neg a$ y a .
- En $(b \wedge a \wedge \neg b)$ tenemos b y $\neg b$.

4.4.1. Certificado del by

En el resto de la sección, entramos en detalle de cómo generar una demostración para cada paso del by.

1. **Subsección 4.4.2 (Razonamiento por el absurdo)**: primero necesitamos una forma de razonar por el absurdo, que nos permita asumir la negación de la fórmula que queremos demostrar para deducir \perp . Esto lo hacemos mediante dos reglas admisibles: la eliminación de doble negación ($E\neg\neg$), equivalente a LEM, y cut que nos permite juntar demostraciones.
2. **Subsección 4.4.3 (DNF)**: luego vemos cómo demostrar de forma automática que una fórmula es equivalente a su versión en DNF, que se realiza a partir de un sistema de reescritura implementado como una clausura reflexiva transitiva de un *paso* de transformación.
3. **Subsección 4.4.4 (Contradicciones)**: una vez que la fórmula está en DNF, tenemos que demostrar a partir de ella una contradicción.
4. **Subsección 4.4.5 (Eliminación de cuantificadores universales)**: si no se encuentra una contradicción de forma simple, se procede a eliminar \forall consecutivos y reiniciar el proceso pero con unificación de fórmulas en lugar de igualdad, para así instanciar las variables cuantificadas universalmente.
5. **Subsección 4.4.6 (Poder expresivo)**: finalmente evaluamos el poder expresivo del *solver* implementado, que resulta completo para proposicional y heurístico para primer orden.

4.4.2. Razonamiento por el absurdo

Queremos asumir que no vale la fórmula original, es decir $\neg(B_1 \wedge \dots \wedge B_n \rightarrow A)$, y llegar a una contradicción. Pero en la demostración que estamos generando, tenemos que demostrar $(B_1 \wedge \dots \wedge B_n \rightarrow A)$. ¿Cómo se puede razonar por el absurdo?

De la misma forma que en la [Sección 2.4](#) se introduce *modus tollens* como una regla admisible, para razonar por el absurdo vamos a usar la **eliminación de la doble negación**. Es un principio de razonamiento clásico que es equivalente a LEM.

Teorema 1 (Eliminación de la doble negación). Sea A una fórmula cualquiera. Vale $\neg\neg A \vdash A$, y lo notamos como regla admisible

$$\frac{}{\neg\neg A \vdash A} E_{\neg\neg}$$

Demostración. En deducción natural,

$$\text{LEM} \frac{\frac{}{\neg\neg A \vdash A \vee \neg A} \quad \frac{}{\neg\neg A, A \vdash A} \text{Ax} \quad \frac{\text{Ax} \frac{}{\neg\neg A, \neg A \vdash \neg\neg A} \quad \frac{}{\neg\neg A, \neg A \vdash \neg A} \text{Ax}}{\neg\neg A, \neg A \vdash A} E_{\vee}}{\neg\neg A \vdash A} E_{\neg}$$

□

¿Cómo lo usamos? Introducimos otra regla admisible: **cut**, que nos permite “pegar” demostraciones entre sí. Si estamos queriendo demostrar A , y queremos reducir el problema a B que sí podemos probar, esta regla nos permite hacerlo.

Teorema 2 (Cut). La siguiente regla de inferencia es admisible

$$\frac{\Gamma, B \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A} \text{cut}$$

Demostración. La regla cut se puede ver como un *macro* que por atrás genera la siguiente demostración

$$\frac{\frac{\Gamma, B \vdash A}{\Gamma \vdash B \rightarrow A} I_{\rightarrow} \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A} E_{\rightarrow}$$

□

Ejemplo 6. Cut nos permite continuar la demostración por otra fórmula a partir de la cual podamos demostrar la original. Sean $\Pi_{B \rightarrow A}$ una demostración de $B \vdash A$ y Π_B una demostración de B (la continuación). Podemos usar cut de la siguiente manera.

$$\frac{\frac{\Pi_{B \rightarrow A}}{\Gamma, B \vdash A} \quad \frac{\Pi_B}{\Gamma \vdash B}}{\Gamma \vdash A} \text{cut}$$

Que es certificado como

$$\frac{\frac{\Pi_{B \rightarrow A}}{\Gamma, B \vdash A} \quad \frac{\Pi_B}{\Gamma \vdash B}}{\Gamma \vdash A} E_{\rightarrow}$$

Notación. *Notación nueva!* En los casos en donde queramos continuar la demostración por la nueva y la demostración de la implicación sea omitida (por ejemplo por ser una regla admisible) lo notaremos de la siguiente forma más sucinta

$$\frac{\Pi_B}{\frac{\Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A} \text{ cut, } \Pi_{B \rightarrow A}}$$

Lema 1 (Razonamiento por el absurdo). Imaginemos que queremos demostrar A por el absurdo. Podemos juntar con cut con la eliminación de la doble negación, pasando a demostrar $\neg\neg A$, que para introducirla, debemos demostrar el juicio $\Gamma, \neg A \vdash \perp$. Es decir, asumiendo que no es cierta la fórmula, deducimos una contradicción. Justo lo que estábamos buscando para razonar por el absurdo.

$$\frac{\frac{\frac{\vdots}{\Gamma, \neg A \vdash \perp} \text{I}_{\neg}}{\Gamma \vdash \neg\neg A} \text{cut, } \frac{\frac{\vdots}{\Gamma, \neg\neg A \vdash A} \text{E}_{\neg\neg}}{\Gamma \vdash A} \text{cut}}$$

Que también se puede notar de la siguiente forma

$$\frac{\frac{\frac{\vdots}{\Gamma, \neg A \vdash \perp} \text{I}_{\neg}}{\Gamma \vdash \neg\neg A} \text{cut, } \frac{\vdots}{\Gamma \vdash A} \text{E}_{\neg\neg}}$$

Obs. A $\text{E}_{\neg\neg}$ La formulamos como $\neg\neg A \vdash A$ y la usamos con **cut**, pero otra alternativa equivalente, levemente más tediosa para generar demostraciones, hubiera sido demostrarla como $\neg\neg A \rightarrow A$ y usarla con E_{\rightarrow} directamente.

4.4.3. DNF

Tenemos que generar una demostración de que la negación de la tesis genera una contradicción, pero lo queremos hacer a partir de la tesis en DNF. ¿Cómo la convertimos?

Def. 11 (DNF). Una fórmula está en **forma normal disyuntiva** o DNF (*disjunctive normal form*) si es una disyunción de conjunciones de literales. Llamamos **cláusulas** a las conjunciones que la componen. Un literal será un predicado, una negación de un predicado o una fórmula cualquiera que comienza con un cuantificador. Ejemplos:

- $a \wedge b$ está en DNF
- $(a \wedge c) \vee (a \wedge b)$ también
- $(a \rightarrow b) \vee (a \wedge b)$ no lo está
- $(\forall x.(a \rightarrow b)) \vee (a \wedge b)$ si.

Teorema 3 (Conversión a DNF). Para toda fórmula A , existe A_{DNF} su equivalente en DNF. Y vale $A \vdash A_{\text{DNF}}$.

Obs. 1. Continuamos la demostración por la refutación de la fórmula en DNF mediante el uso de cut.

$$\frac{\frac{\vdots}{\Gamma, A, A_{\text{DNF}} \vdash \perp} \quad \frac{\vdots}{\Gamma, A \vdash A_{\text{DNF}}}}{\Gamma, A \vdash \perp} \text{ cut}$$

Para convertir una fórmula cualquiera a DNF, vamos a implementar una traducción *small-step* implementando el siguiente sistema de reescritura.

$\neg\neg a \rightsquigarrow a$	eliminación de $\neg\neg$
$\neg\perp \rightsquigarrow \top$	
$\neg\top \rightsquigarrow \perp$	
$a \rightarrow b \rightsquigarrow \neg a \vee b$	definición de implicación
$\neg(a \vee b) \rightsquigarrow \neg a \wedge \neg b$	distributiva de \neg sobre \vee
$\neg(a \wedge b) \rightsquigarrow \neg a \vee \neg b$	distributiva de \neg sobre \wedge
$(a \vee b) \wedge c \rightsquigarrow (a \wedge c) \vee (b \wedge c)$	distributiva de \wedge sobre \vee (der)
$c \wedge (a \vee b) \rightsquigarrow (c \wedge a) \vee (c \wedge b)$	distributiva de \wedge sobre \vee (izq)
$a \vee (b \vee c) \rightsquigarrow (a \vee b) \vee c$	asociatividad de \vee
$a \wedge (b \wedge c) \rightsquigarrow (a \wedge b) \wedge c$	asociatividad de \wedge

Fig. 4.4: Sistema de reescritura para conversión a DNF de forma sintáctica

Pero no podemos hacerlo meramente de forma sintáctica, sino que tenemos *generar una demostración* para cada equivalencia.

Congruencias

Hay pasos de la traducción a DNF en donde tenemos que reemplazar una sub-fórmula por una equivalente. Por ejemplo para reescribir $a \vee \neg(b \vee c) \rightsquigarrow a \vee (\neg b \wedge \neg c)$ reescribimos la sub-fórmula $\neg(b \vee c) \rightsquigarrow \neg b \wedge \neg c$. Esto de forma sintáctica sería trivial, basta con hacerlo recursivamente. Pero para demostrarlo hay que usar la *congruencia* de los conectivos, que también hay que demostrar.

$$\begin{aligned} A \vdash A' &\Rightarrow A \wedge B \vdash A' \wedge B \\ A \vdash A' &\Rightarrow A \vee B \vdash A' \vee B \\ A' \vdash A &\Rightarrow \neg A \vdash \neg A' \end{aligned}$$

No hay regla de congruencia para \rightarrow pues se convierte en un \vee . Es sumamente importante observar que \neg es *contravariante*, para demostrar $\neg A \vdash \neg A'$ no necesitamos una demostración de $A \vdash A'$, sino de $A' \vdash A$. Esto quiere decir que para todas las equivalencias, incluso las congruencias, no nos alcanza con demostrarlas en un solo sentido, sino que vamos a necesitar ambos, la ida y la vuelta: para $\neg(a \vee b) \rightsquigarrow \neg a \wedge \neg b$ necesitamos $\neg(a \vee b) \vdash \neg a \wedge \neg b$ y $\neg a \wedge \neg b \vdash \neg(a \vee b)$. lo notamos como

$$\neg(a \vee b) \dashv\vdash \neg a \wedge \neg b$$

Algoritmo

Finalmente, el algoritmo para generar la demostración de la conversión de una fórmula en DNF se implementa de forma *small-step*. La conversión se implementa como la clausura reflexiva transitiva de la conversión de un paso (es decir, aplicarla 0 o más veces hasta que no cambie). Estos pasos pueden ser o bien ser un paso de reescritura, o uno de congruencia reescribiendo una sub-fórmula. En cada uno se usa una de las siguientes reglas.

Pasos base

$$\begin{aligned}
\neg\neg a &\dashv\vdash a \\
\neg\perp &\dashv\vdash \top \\
\neg\top &\dashv\vdash \perp \\
a \rightarrow b &\dashv\vdash \neg a \vee b \\
\neg(a \vee b) &\dashv\vdash \neg a \wedge \neg b \\
\neg(a \wedge b) &\dashv\vdash \neg a \vee \neg b \\
(a \vee b) \wedge c &\dashv\vdash (a \wedge c) \vee (b \wedge c) \\
c \wedge (a \vee b) &\dashv\vdash (c \wedge a) \vee (c \wedge b) \\
a \vee (b \vee c) &\dashv\vdash (a \vee b) \vee c \\
a \wedge (b \wedge c) &\dashv\vdash (a \wedge b) \wedge c
\end{aligned}$$

Pasos recursivos de congruencia (con $A \dashv\vdash A'$)

$$\begin{aligned}
A \wedge B &\dashv\vdash A' \wedge B \\
A \vee B &\dashv\vdash A' \vee B \\
\neg A &\dashv\vdash \neg A'
\end{aligned}$$

Fig. 4.5: Pasos de conversión a DNF

En total son 26 demostraciones. Nos ahorramos los detalles porque son bien conocidas (por ej. DeMorgan).

(DUDA: Demostración de que termina? De que es correcto? Al menos una cita para que sea más confiable el sistema de reescritura? O se asume como bien conocido?)

4.4.4. Contradicciones

Tenemos la fórmula traducida a DNF. Debemos demostrar una contradicción a partir de ella. Si tenemos las cláusulas $C_1 \vee C_2$, podemos demostrar $C_1 \vee C_2 \vdash \perp$ usando EV y deducir una contradicción asumiendo cada una. Esto se generaliza a N cláusulas mediante el uso de EV anidados. Por esto decimos que hay que “*refutar cada cláusula*”. El método tiene tres formas de hacerlo

- Contienen fórmulas opuestas: $A \wedge \neg A$ (con E \neg)

- Contienen \perp
- Eliminando cuantificadores universales consecutivos (próxima sección)

Para los primeros dos, es necesario demostrar a partir de la cláusula una fórmula. Pero como pueden tener una cantidad arbitraria, según cómo esté asociado el \wedge , una demostración a mano de $A_1 \wedge \dots \wedge A_i \wedge \dots \wedge A_n \vdash A_i$, puede ser muy laboriosa, dado que las reglas son binarias y habría que usar $E\wedge_1$ y $E\wedge_2$ anidados. Para simplificarlo demostramos otra regla admisible, la proyección de un elemento $E\wedge_\varphi$.

Teorema 4 (Regla admisible $E\wedge_\varphi$). Sea φ alguna fórmula de la conjunción $\varphi_1 \wedge \dots \wedge \varphi_n$. Notamos por $E\wedge_\varphi$ a la proyección de la fórmula, sin importar en qué posición de la conjunción está.

$$\frac{\Gamma \vdash \varphi_1 \wedge \dots \wedge \varphi_i \wedge \dots \wedge \varphi_n \quad n \in \mathbb{N}}{\Gamma \vdash \varphi_i} E\wedge_{\varphi_i}$$

Demostración. Para generar la demostración correspondiente usando $E\wedge_1$ y $E\wedge_2$, basta con identificar el camino hacia φ_i , y luego caminar recursivamente el \wedge usando $E\wedge_1$ si el camino continúa por la izquierda y $E\wedge_2$ si sigue por la derecha. \square

Ejemplo 7 (Contradicción). Veamos un ejemplo de las primeras dos formas de refutar cláusulas. Los cuantificadores universales los veremos en la siguiente sección.

$$\frac{\text{Ax} \frac{\Gamma \vdash (\neg a \wedge a \wedge \neg b) \vee (b \wedge a \wedge \perp)}{\Gamma \vdash (\neg a \wedge a \wedge \neg b) \vee (b \wedge a \wedge \perp) \vdash \perp} \quad \Pi_L \quad \frac{\frac{\Gamma_1 \vdash b \wedge a \wedge \perp}{\Gamma, b \wedge a \wedge \perp \vdash \perp} \text{Ax} \quad E\wedge_\perp}{\Gamma \vdash (\neg a \wedge a \wedge \neg b) \vee (b \wedge a \wedge \perp) \vdash \perp} E\vee$$

donde

$$\Pi_L = \frac{\frac{\Gamma_1 \vdash \neg a \wedge a \wedge \neg b}{\Gamma_1 \vdash \neg a} \text{Ax} \quad E\wedge_{\neg a} \quad \frac{\Gamma_1 \vdash \neg a \wedge a \wedge \neg b}{\Gamma_1 \vdash a} \text{Ax} \quad E\wedge_a}{\Gamma_1 = \Gamma, b \wedge a \wedge \perp \vdash \perp} E\neg$$

(DUDA: No se si me convence la notación $E\wedge_\alpha$, después de todo es una proyección y se suele notar con Π , pero ese símbolo lo estamos usando para representar demostraciones (ej. Π_L).)

4.4.5. Eliminación de cuantificadores universales

Hasta ahora logramos razonar por el absurdo, convertir la fórmula a DNF, y encontrar una contradicción siempre que no haya que eliminar cuantificadores universales. Pero es usual que en una teoría de primer orden, los axiomas contengan cuantificadores universales y sea necesario eliminarlos para poder demostrar un **by**. Al eliminarlos, vamos a reemplazar las ocurrencias de su variable por *meta-variables*: aquellas que pueden ser unificadas.

Def. 12 (Unificación). Sean A, B dos fórmulas. Decimos que *unifican* y lo notamos $A \doteq B$ si existe una sustitución de meta-variables tal que $A = B$. Veamos algunos ejemplos. Sean u, v meta-variables.

- $p(u) \doteq p(a)$ con $\{u := a\}$
- $p(u) \not\doteq q(a)$
- $p(u) \wedge q(b) \doteq p(a) \wedge q(v)$ con $\{u := a, v := b\}$
- $p(u) \rightarrow q(b) \not\doteq p(a) \wedge q(v)$

(DUDA: Hace falta agregar el algoritmo de unificación que implementamos?)

Ejemplo 8 (Ejemplo de by con cuantificadores). Tenemos el siguiente programa

```

1  axiom ax1: forall X . p(X) -> q(X)
2  axiom ax2: p(a)
3  theorem t: q(a)
4  proof
5    thus q(a) by ax1, ax2
6  end

```

Para certificar **thus q(a) by ax1, ax2** hay que generar una demostración para la implicación $\left((\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \right) \rightarrow q(a)$.

1. Negamos la fórmula

$$\neg \left[\left((\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \right) \rightarrow q(a) \right].$$

2. La convertimos a DNF

$$\begin{aligned}
& \neg \left[\left((\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \right) \rightarrow q(a) \right] \\
& \equiv \neg \left[\neg \left((\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \right) \vee q(a) \right] & (A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B) \\
& \equiv \neg \neg \left((\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \right) \wedge \neg q(a) & (\neg(A \vee B) \equiv \neg A \wedge \neg B) \\
& \equiv (\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))) \wedge p(a) \wedge \neg q(a) & (\neg \neg A \equiv A)
\end{aligned}$$

como a los ojos de DNF un \forall es opaco, a pesar de que dentro tenga una implicación, la fórmula ya está en forma normal.

3. Buscamos una contradicción refutando cada cláusula. No hay forma encontrando literales opuestos o \perp , por ej. la cláusula $p(a)$ no es refutable.
4. Probamos eliminando $\forall x.(p(x) \rightarrow q(x))$. Reemplazamos x por una meta-variable fresca u .

$$(p(u) \rightarrow q(u)) \wedge p(a) \wedge \neg q(a)$$

¡No está en DNF! Hay que volver a convertir.

5. Convertimos a DNF

$$\begin{aligned}
& (p(u) \rightarrow q(u)) \wedge p(a) \wedge \neg q(a) \\
& \equiv (\neg p(u) \vee q(u)) \wedge p(a) \wedge \neg q(a) & (A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B) \\
& \equiv ((\neg p(u) \wedge p(a)) \vee (q(u) \wedge p(a))) \wedge \neg q(a) & ((A \vee B) \wedge C \equiv (A \wedge C) \vee (B \wedge C)) \\
& \equiv (\neg p(u) \wedge p(a) \wedge \neg q(a)) \vee & ((A \vee B) \wedge C \equiv (A \wedge C) \vee (B \wedge C)) \\
& \quad (q(u) \wedge p(a) \wedge \neg q(a))
\end{aligned}$$

6. Buscamos una contradicción refutando cada cláusula. Esta vez, no podemos volver a eliminar un forall (por motivos de eficiencia) y los literales opuestos tienen que *unificar* en lugar de ser iguales. Las sustituciones tienen que ser compatibles entre todas las cláusulas (no pueden asignar valores diferentes a la misma meta-variable)

- $\neg p(u) \wedge p(a) \wedge \neg q(a)$ tenemos $p(u) \doteq p(a)$ con $\{u := a\}$
- $q(u) \wedge p(a) \wedge \neg q(a)$ tenemos $q(u) \doteq q(a)$ con $\{u := a\}$

Algoritmo

1. Si la cláusula no puede ser refutada por contener \perp ni literales opuestos,
2. Para cada fórmula, si comienza con \forall (ej. $\forall x_0. \forall x_1 \dots \forall x_n. p(x_0, \dots, x_n)$) se busca una refutación sin generar la demostración.
 - Para cada combinación de prefijos de \forall consecutivos, se reemplazan sus variables por meta-variables frescas, se re-convierte a DNF y se intenta encontrar una refutación (unificando con α -equivalencia)
 - $\forall x_1 \dots \forall x_n. p(u_0, \dots, x_n)$
 - \dots
 - $p(u_0, \dots, u_n)$
 - Se usa la menor cantidad de eliminaciones posibles.
 - Si puede ser refutada, nos da como resultado una sustitución que asigna a cada meta-variable u_i un término t_i .
3. Se usa $E\forall$ reemplazando cada variable por el término asignado a la meta-variable correspondiente, para obtener la fórmula con los \forall eliminados, y luego se genera la demostración de la refutación de la forma usual.

Ejemplo 9 (Eliminación consecutiva minimal). Si se tiene

$$(\forall x. \forall y. p(x) \vee q(y)) \wedge \neg p(a) \wedge \neg q(b)$$

se reemplazarían tanto x como y por meta-variables frescas u_0 y u_1 , quedando así $(p(u_0) \vee q(u_1)) \wedge \neg p(a) \wedge \neg q(b)$ que se podrá refutar. En cambio, en

$$(\forall x. \forall y. p(x) \wedge q(y)) \wedge \neg(\forall z. p(a) \wedge q(z))$$

es necesario eliminar solamente $\forall x$. Y la unificación será capaz de tener en cuenta la α equivalencia, así puede unificar $\forall y. p(u_0) \wedge q(y) \doteq \forall z. p(a) \wedge q(z)$.

Ejemplo 10 (Eliminación de una sola fórmula). Se eliminan los \forall consecutivos de una sola fórmula de la cláusula. Por ejemplo, en la siguiente o bien eliminamos $\forall x. p(x)$ o $\forall y. q(y)$ pero no ambos.

$$(\forall x. p(x)) \wedge (\forall y. q(y)) \wedge \neg p(a) \wedge \neg q(b)$$

Compatibilidad de sustituciones

Como cada cláusula se refuta por separado, hay que asegurar que las sustituciones de cada una sean compatibles entre sí. Es decir, que no asignen términos diferentes a las mismas meta-variables. Esto quiere decir que debemos probar con todas las sustituciones posibles, porque puede haber combinaciones que la hagan incompatible. Por ejemplo, en las siguientes cláusulas hay más de una sustitución candidata para cada una.

- $f(u_0) \wedge \neg f(a) \wedge \neg f(b)$ tenemos $\{u_0 := a\}$, $\{u_0 := b\}$
- $f(u_0) \wedge \neg f(b)$ solo $\{u_0 := b\}$

Pero si en la primera nos quedamos con $\{u_0 := a\}$, no podríamos refutar la 2da. Por lo tanto la correcta es $\{u_0 := b\}$.

4.4.6. Poder expresivo

(DUDA: Está bien decir poder expresivo?)

El solver implementado es **completo para lógica proposicional**, pero heurístico para lógica de primer orden. Esto es aceptable, puesto que la satisfacibilidad de lógica de primer orden es indecidible (por el teorema de Church [Par]), y además el objetivo del trabajo no fue dar el mejor solver, sino dar alguno que se pueda certificar.

Teorema 5. El solver es **completo** para lógica proposicional. Es decir, sea φ una fórmula cualquiera. Si es universalmente válida, $\vdash \varphi$, entonces el solver encuentra una demostración.

Demostración. (DUDA: Citar Hilbert 1950?) Lo hacemos semánticamente. Sea φ una fórmula proposicional cualquiera, supongamos que es válida. Queremos argumentar que el solver va a poder generar una demostración para ello. Sabemos que es válida si y solo si su negación es insatisfactible

$$\vdash \varphi \iff \not\vdash \neg \varphi$$

, por lo que es correcto buscar una refutación de la negación. Además, siempre vamos a poder convertir $\neg \varphi$ a DNF, por lo que tenemos

$$\not\vdash \neg \varphi \iff \not\vdash (a_1 \wedge \dots \wedge a_n) \vee \dots \vee (b_1 \wedge \dots \wedge b_m).$$

Para que sea insatisfactible, por definición de la semántica de \vee todas las cláusulas tienen que serlo. Para que una cláusula lo sea, no tiene que haber una valuación que la haga verdadera. Supongamos que lo es y existe una valuación v . Esta valuación está unívocamente determinada: al ser una conjunción, tiene que asignar a cada literal p_i un 1 si es positivo o un 0 si es negativo. Luego, no será verdadera si y solo si aparece la misma variable y su opuesta, o si aparece \perp . Como esto es exactamente lo que busca el solver, concluimos que si es refutable, siempre va a poder refutarla.

(DUDA: Está suficientemente bien escrito esto? Supongo que no. En la intro hay que agregar las definiciones de la semántica de LPO.) □

Teorema 6. El solver es **incompleto** para lógica de primer orden.

Demostración. El siguiente es un contra ejemplo, que no encuentra la refutación porque para ello debería eliminar ambos \forall , pero elimina a lo sumo los de una fórmula.


```

1 axiom ax1: forall X . p(X) -> q(X)
2 axiom ax2: forall X . p(X)
3 theorem t: q(a)
4 proof
5   thus q(a) by ax1, ax2
6 end

```

Pero esto no es lo único que le falta para ser completo. También se podría dar un contra ejemplo más burdo que requiera un *SAT solver* completo. \square

4.4.7. Azúcar sintáctico

Antes mencionamos que se puede usar **hence** en lugar de **thus** referenciando automáticamente a la hipótesis anterior, y análogamente lo mismo para **have** y **then**. Esto se implementa desde el *parser*, todo se compila como los comandos base, y se agrega la hipótesis anterior (-) cuando es necesario. Esto simplifica al certificador permitiendo que solo conozca a **have** y **thus**.

4.5. Descarga de conjunciones

¿Cómo podemos certificar el siguiente programa?

```

1 axiom "a": a
2 axiom "b": b
3 axiom "c": c
4 axiom "d": d
5 axiom "e": e
6 theorem "and discharge" : (a & b) & ((c & d) & e)
7 proof
8   thus a & e by "a", "e"
9   thus d by "d"
10  thus b & c by "b", "c"
11 end

```

Veamos en particular el primer comando de la demostración. La tesis es una conjunción que está asociada de una forma particular, y se quiere demostrar $a \wedge e$ que es parte de la tesis.

1. Se convierte la conjunción y lo que se demuestra en conjuntos

$$\begin{aligned}
 (a \wedge b) \wedge ((c \wedge d) \wedge e) &\rightsquigarrow \{a, b, c, d, e\} \\
 (a \wedge e) &\rightsquigarrow \{a, e\}
 \end{aligned}$$

2. Si está contenido, se separa lo demostrado y el resto

$$\{a, b, c, d, e\} \rightsquigarrow \{b, c, d\} \{a, e\}$$

3. Se construye una *nueva tesis* reordenando la fórmula de forma tal que sea sencillo hacer $I \wedge$ (poniendo a la izquierda lo demostrado aislado de lo demás)

$$(a \wedge e) \wedge (b \wedge c \wedge d)$$

De esa forma, al usar la regla

$$\frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I\wedge$$

la demostración de $a \wedge e$ se hace de la forma usual con `by`, y se reduce la tesis a $b \wedge c \wedge d$ continuando la certificación por allí, insertando la demostración resultante en $\Gamma \vdash B$.

4. Para demostrar la equivalencia entre la tesis vieja y su versión re-ordenada se usa el mismo `solver` que el `by`. Al ser completo para proposicional, también puede resolver equivalencias por asociatividad y re-orden.

Finalmente, queda certificado como

$$\text{solver} \frac{\frac{\Gamma \vdash (a \wedge e) \wedge (b \wedge c \wedge d) \rightarrow (a \wedge b) \wedge ((c \wedge d) \wedge e)}{\Gamma \vdash (a \wedge e) \wedge (b \wedge c \wedge d)} \quad \frac{\frac{\Gamma \vdash a \wedge e}{\Gamma \vdash (a \wedge e) \wedge (b \wedge c \wedge d)} \text{by} \quad \frac{\Gamma \vdash b \wedge c \wedge d}{\Gamma \vdash (a \wedge e) \wedge (b \wedge c \wedge d)} I\wedge}{\Gamma \vdash (a \wedge b) \wedge ((c \wedge d) \wedge e)} E\rightarrow$$

4.6. Comandos correspondientes a reglas de inferencia

Como se puede ver en [Tabla 3.1 \(Reglas de inferencia y comandos\)](#), muchos de los comandos se corresponden directamente con reglas de inferencia, por lo que su traducción es directa.

■ **take** ($I\exists$)

Si la tesis es **exists** x . a , el comando **take** $x := t$ la reduce a a con x reemplazado por t y la certifica como

$$\frac{\Gamma \vdash A\{x := t\}}{\Gamma \vdash \exists x.A} I\exists$$

insertando la demostración certificada del resto en $\Gamma \vdash A\{x := t\}$

■ **consider** ($E\exists$)

El comando **consider** x **st** h : a **by** $h1, \dots, hn$ se certifica como

$$\frac{\Gamma \vdash \exists x.A \quad \Gamma, A \vdash B \quad x \notin fv(\Gamma, B)}{\Gamma \vdash B} E\exists$$

- $\Gamma \vdash \exists x.A$ se demuestra mediante el `by`.
- Se agrega la hipótesis h : a al contexto como axioma, se continúa la certificación y se inserta la demostración resultante en $\Gamma, A \vdash B$.

■ **let** ($I\forall$)

Si la tesis es **forall** x . a , el comando **let** x reduce la tesis a a y continúa la certificación, insertando el resultado en la demostración de $\Gamma \vdash A$

$$\frac{\Gamma \vdash A \quad x \notin fv(\Gamma)}{\Gamma \vdash \forall x.A} \text{IV}$$

■ **cases** (EV)

El comando

```

cases by h1, ..., hn
  case c1
  ...
  case cm
end

```

se certifica como varios EV anidados, en donde el primer \forall se certifica mediante by. Cada rama certifica la sub-demostración agregando la hipótesis del caso al contexto como axioma.

$$\frac{\Gamma \vdash A \vee B \quad \Gamma, A \vdash C \quad \Gamma, B \vdash C}{\Gamma \vdash C} \text{EV}$$

■ **suppose** ($I \rightarrow$, $I \neg$)

Si la tesis es $a \rightarrow b$, el comando **suppose** $h: a$ reduce la tesis a b y agrega al contexto la hipótesis $h: a$ como axioma. La certifica como

$$\frac{\Gamma, A \vdash B}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} I \rightarrow$$

insertando el resto de la demostración certificada en su sub-demostración.

Si la tesis es $\sim a$, es análogo pero interpretándolo como $a \rightarrow \mathbf{false}$.

4.7. Comandos adicionales

■ **equivalently**

Si la tesis es a , el comando **equivalently** a' usa el mismo solver que el by para demostrar $a' \rightarrow a$ y reduce la tesis a a' .

■ **claim**

La certificación del comando

```

claim h: f
proof
  ...
end

```

Consiste en certificar la sub-demostración y agregar la hipótesis $h: f$ como teorema al contexto.

5. EXTRACCIÓN DE TESTIGOS DE EXISTENCIALES

En los capítulos anteriores vimos como el lenguaje PPA puede ser usado para escribir demostraciones de alto nivel, que son certificadas generando demostraciones de bajo nivel usando el sistema lógico de deducción natural. Ahora vamos a introducir una nueva funcionalidad: la **extracción de testigos**.

```

1 axiom ax: p(v)
2 theorem t: exists X . p(X)
3 proof
4   take X := v
5   thus p(v) by ax
6 end

```

Fig. 5.1: Extracción simple

```

1 axiom ax: forall Y . p(Y, v)
2 theorem t:
3   forall X. exists V . p(X, V)
4 proof
5   let X
6   take V := v
7   thus p(X, v) by ax
8 end

```

Fig. 5.2: Extracción con instanciación

```

1 axiom ax1: q(m)
2 axiom ax2: forall X. q(X) -> p(X)
3
4 theorem t1: exists X. q(X)
5 proof
6   take X := m
7   thus q(m) by ax1
8 end
9
10 theorem t2: exists X. p(X)
11 proof
12   consider Y st h: q(Y) by t1
13   take X := Y
14   hence p(Y) by ax2
15 end

```

Fig. 5.3: Extracción indirecta

Por ejemplo, en el programa [Figura 5.1 \(Extracción simple\)](#) la extracción nos permitirá encontrar un término t que sea testigo de $\exists x.p(x)$, es decir que cumpla $p(t)$. En este caso es fácil encontrarlo a ojo sobre la demostración de PPA, sería v . Pero puede haber casos en donde no sea tan trivial, como en el programa [Figura 5.3 \(Extracción indirecta\)](#), en donde en el **theorem** t2 se instancia la variable en un término de forma indirecta. Además, también querríamos poder extraer en casos donde haya cuantificadores universales, como en [Figura 5.2 \(Extracción con instanciación\)](#). Aquí, ya que vale para todo Y , querríamos poder instanciarlo en un término cualquiera. Por ejemplo $p(v, f(v))$.

Buscamos un mecanismo general, que nos permita a partir de cualquier demostración una fórmula de la pinta $\forall x_0 \dots \forall x_n \exists y. \varphi(x_0, \dots, x_n, y)$ extraer un testigo u tal que, para t_0, \dots, t_n cuales quiera, valga $\varphi(t_0, \dots, t_n, u)$. Vamos a hacerlo a partir de los certificados de deducción natural.

5.1. La lógica clásica no es constructiva

El objetivo es extraer el testigo de las demostraciones generadas por el certificador, pero estas son en lógica clásica, que tiene el gran problema de que en general **no es constructiva**. ¿Qué quiere decir? Puede suceder que una demostración de $\exists x.p(x)$ no diga explícitamente quien es x , y por lo tanto no podamos extraer un testigo. Esto sucede dado que en la lógica clásica vale el *principio del tercero excluido* o LEM

Prop. 1 (LEM). Para toda fórmula A , es verdadera ella o su negación

$$A \vee \neg A$$

Las demostraciones que usan este principio suelen dejar aspectos sin concretizar, como muestra el siguiente ejemplo bien conocido:

Teorema 7. Existen dos números irracionales, a, b tales que a^b es racional

Demostración. Considerar el número $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$. Por LEM, es o bien racional o irracional.

- Supongamos que es racional. Como sabemos que $\sqrt{2}$ es irracional, podemos tomar $a = b = \sqrt{2}$ que por hipótesis es racional.
- Supongamos que es irracional. Tomamos $a = \sqrt{2}^{\sqrt{2}}, b = \sqrt{2}$. Ambos son irracionales, y tenemos

$$a^b = \left(\sqrt{2}^{\sqrt{2}} \right)^{\sqrt{2}} = \sqrt{2}^{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \sqrt{2}^2 = 2,$$

que es racional.

En ambos casos podemos encontrar a, b tales que a^b es racional. \therefore existen. \square

La prueba no nos da forma de saber cuales son a y b . Es por eso que en general, en lógica clásica, tener una demostración de un teorema que afirma la existencia de un objeto que cumpla cierta propiedad, no necesariamente nos da una forma de encontrar tal objeto. De esta demostración nunca podríamos extraer un testigo. Pero se podría haber demostrado de otra forma que sí sea constructiva, y omita el uso de LEM. En particular tomando $a = \sqrt{2}$ y $b = 2 \log_2 3$ (ver [Bau]) ¿Es este el caso con todas las demostraciones?

Ejemplo 11 (Demostración no constructiva). Si consideramos la fórmula

$$\exists x.((x = 1 \wedge C) \vee (x = 0 \wedge \neg C))$$

y pensamos en C como algo indecidible, por ejemplo **HALT**, trivialmente podemos demostrarlo de forma no constructiva (LEM con $C \vee \neg C$) pero nunca de forma constructiva.

5.2. Lógica intuicionista

Como alternativa a la lógica clásica existe la lógica **intuicionista**, que se puede definir como la lógica clásica sin LEM¹. Al no valer ese principio, las demostraciones siempre son constructivas. Esto permite por un lado tener interpretaciones computacionales (como la *BHK*) y además que exista la noción de *forma normal* de una demostración. Existen métodos bien conocidos para reducir pruebas hacia su forma normal con un proceso análogo a una reducción de cálculo λ .

Esto permite usar como estrategia de extracción la siguiente: normalizar la demostración y obtener el testigo de la forma normal. En ella, se esperaría que toda demostración de un \exists sea mediante $I\exists$, explicitando el testigo.

¹ Al no tener LEM, tampoco valen principios de razonamiento clásicos equivalentes, como la eliminación de la doble negación.

5.3. Estrategia de extracción de testigos

Queremos extraer testigos de las demostraciones generadas por el certificador de PPA, pero son en lógica clásica. Sabemos que podemos hacerlo para lógica intuicionista. ¿Cómo conciliamos ambos mundos? Existen métodos que permiten *embeber* la lógica clásica en la intuicionista. Uno de ellos es la **traducción de Friedman** que se aborda en la siguiente sección (5.4). La estrategia general entonces es la siguiente (esquematizada en la Figura 5.4), dada una demostración en PPA como por ejemplo de Figura 5.1:

1. La certificamos generando una demostración clásica en deducción natural, usando el `PPA.Certifier`. Nos da un contexto con una demostración por teorema.
2. Generamos una única demostración haciendo *inline* de las demostraciones de otros teoremas citados, así cuando se reduce, se reduce la demostración completa y no una parte.
3. Usamos la traducción de Friedman para obtener una demostración intuicionista de la misma fórmula.

Restricción: La fórmula a demostrar debe ser de la forma $\forall y_0 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi$.

4. Instanciamos las variables de los \forall en términos proporcionados por el usuario, quedando una fórmula de la forma $\exists x. A$.
5. Normalizamos la demostración.

Limitación: No vamos a poder llevar cualquier demostración a su forma normal.

6. Al ser una demostración normalizada de un \exists , debe comenzar con $I\exists$, que especifica el término que hace cierta la fórmula. Este es precisamente el testigo que estábamos buscando.

$$\frac{\Gamma \vdash A\{x := t\}}{\Gamma \vdash \exists x. A} I\exists$$

En las siguientes secciones vemos en detalle la traducción de Friedman (Sección 5.4) y la normalización (o reducción) de demostraciones (Sección 5.5). Al final vemos un detalle técnico de la traducción para permitir la reducción que debe limitar la forma de los axiomas (Sección 5.6).

5.4. Traducción de Friedman

5.4.1. Traducción de doble negación

Existen muchos métodos que permiten embeber la lógica clásica en la intuicionista. Un mecanismo general es la traducción de **doble negación**, que tiene distintas variaciones. Una es la *Gödel-Gentzen* [AF98]

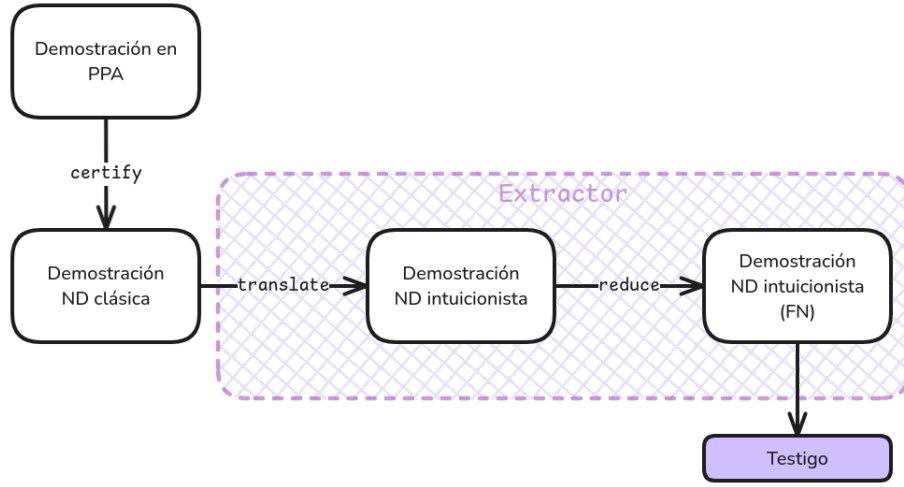


Fig. 5.4: Estrategia de extracción de testigos

Def. 13 (Traducción *Gödel-Gentzen*). Dada una fórmula A se asocia con otra A^N . La traducción se define por inducción estructural.

$$\begin{aligned}
 \perp^N &= \perp \\
 \top^N &= \top \\
 A^N &= \neg\neg A \quad \text{con } A \text{ atómica} \\
 (A \wedge B)^N &= A^N \wedge B^N \\
 (A \vee B)^N &= \neg(\neg A^N \wedge \neg B^N) \\
 (A \rightarrow B)^N &= A^N \rightarrow B^N \\
 (\forall x. A(x))^N &= \forall x. A(x)^N \\
 (\exists x. A(x))^N &= \neg\forall x. \neg A(x)^N
 \end{aligned}$$

Def. 14 (Traducción de contextos). Se extiende a contextos de la forma esperable

$$\Gamma^N = \{A^N \mid A \in \Gamma\}.$$

Notación. Notamos,

- \vdash_C para expresar que un juicio es derivable en lógica clásica, y \vdash_I para intuicionista.
- $\Pi \triangleright \Gamma \vdash A$ para expresar que Π es una demostración de $\Gamma \vdash A$. Equivalente a $\frac{\Pi}{\Gamma \vdash A}$

Teorema 8. Si tenemos $\Gamma \vdash_C A$, luego $\Gamma^N \vdash_I A^N$.

Dada una demostración en lógica clásica, podemos obtener una en lógica intuicionista de su traducción. Pero esto no es exactamente lo que queremos, pues si quisiéramos extraer un testigo de una demostración de la fórmula $\exists x.p(x)$, al traducirla nos quedaría $(\exists x.p(x))^N = \neg\forall x.\neg\neg p(x)$. Si bien su demostración será intuicionista (y por lo tanto constructiva), como no es de un \exists al normalizarla no podremos hacer la extracción.

5.4.2. El truco de Friedman

La idea de Friedman [Miq11] es generalizar la traducción Gödel-Gentzen reemplazando la negación intuicionista $\neg A \equiv A \rightarrow \perp$ por una *relativa* $\neg_R A \equiv A \rightarrow R$ parametrizada por una fórmula arbitraria R . Esto nos va a permitir, con una elección inteligente de R , traducir una demostración clásica de una fórmula a una intuicionista, y usarla para generar una demostración de **la fórmula original**. Esto nos permite reducirla y hacer la extracción. No va a ser posible para cualquier fórmula, sino las de una clase particular (de la forma $\forall y_1 \dots \forall y_m. \exists x_1 \dots \exists x_k. A$ o Π_2^0)

Def. 15 (Traducción de doble negación relativizada).

$$\begin{aligned} \perp^{\neg\neg} &= \perp \\ A^{\neg\neg} &= \neg_R \neg_R A \quad \text{con } A \text{ atómica} \\ (\neg A)^{\neg\neg} &= \neg_R A^{\neg\neg} \\ (A \wedge B)^{\neg\neg} &= A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg} \\ (A \vee B)^{\neg\neg} &= \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg}) \\ (A \rightarrow B)^{\neg\neg} &= A^{\neg\neg} \rightarrow B^{\neg\neg} \\ (\forall x. A)^{\neg\neg} &= \forall x. A^{\neg\neg} \\ (\exists x. A)^{\neg\neg} &= \neg_R \forall x. \neg_R A^{\neg\neg} \end{aligned}$$

Teorema 9. Si $\Gamma \vdash_C A$, luego $\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg}$

Demostración. Dada una demostración en deducción natural clásica $\Gamma \vdash_C A$, podemos traducirla recursivamente extendiendo la traducción de fórmulas a reglas de inferencia, así generando una demostración de $\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg}$. Este proceso está descrito en detalle en [Subsección 5.4.4 \(Traducción de demostraciones\)](#) \square

Vamos a enunciar diferentes versiones de la traducción de Friedman en orden de sofisticación, según para qué clase de fórmulas funcionan. No solo ayuda a entenderla, sino que también fue el mismo enfoque con el que las implementamos. Cada una incluye a la anterior, por lo que en PPA solo quedó implementada la última. Todas emplean la misma estrategia. Usando el [Teorema 9](#), se traduce la demostración clásica a una intuicionista para la fórmula traducida, que se usa para probar la fórmula original.

Def. 16 (Jerarquía aritmética de fórmulas). Clasifica las fórmulas en dos clases: Π_n^0 y Σ_n^0 . Se define por inducción en n .

- Si φ es equivalente a una fórmula sin cuantificadores, está en Π_0^0 y Σ_0^0 .
- Sean las clasificaciones Π_n^0 y Σ_n^0 . Definimos para $n + 1$.
 - Si φ es equivalente a una formula de la forma $\exists x_1 \dots \exists x_k. \psi$ donde ψ es Π_n^0 , entonces φ es asignada la clasificación Σ_{n+1}^0 .
 - Si φ es equivalente a una formula de la forma $\forall x_1 \dots \forall x_k. \psi$ donde ψ es Σ_n^0 , entonces φ es asignada la clasificación Π_{n+1}^0 .

Una fórmula de Σ_n^0 es equivalente a una que comienza con cuantificadores existenciales y alterna $n - 1$ veces entre series de universales y existenciales. Mientras que una Π_n^0 es análoga pero comenzando con universales. Las dos relevantes son:

- Σ_1^0 : fórmulas de la pinta $\exists x_1 \dots \exists x_k. \varphi$.
- Π_2^0 : fórmulas de la pinta $\forall y_1 \dots \forall y_m. \exists x_1 \dots \exists x_k. \varphi$

Obs (Intuición detrás de Σ y Π). Una intuición detrás de los nombres de las clases puede ser

- Σ es una sumatoria, que se puede interpretar como disyunciones (en el sentido del álgebra de Boole), y generalizar con un existencial.
- Π análogamente pero con productoria, conjunciones y universales.

5.4.3. Versiones de la traducción

Podremos probar una fórmula en lógica intuicionista a partir de una demostración clásica solo si está en alguna de estas clases:

1. **Fórmulas Σ_1^0 atómicas** (Teorema 10 usando Lema 2):

$$\exists x. A(x) \text{ con } A \text{ atómica.}$$

2. **Fórmulas Π_2^0 atómicas** (Teorema 11):

$$\forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. A(x, y_1, \dots, y_n) \text{ con } A \text{ atómica.}$$

3. **Fórmulas Π_2^0 no atómicas** (Teorema 12):

$$\forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n) \text{ con } \varphi \text{ no atómica.}$$

Por ejemplo, podría ser $p(x) \wedge q(y_1, \dots, y_n)$. Pero no podrá ser cualquier fórmula, por ej. no $\neg p(x)$. En el Lema 5 damos una caracterización.

Lema 2 (Eliminación de triple negación relativa). $\neg_R \neg_R \neg_R A \iff \neg_R A$ y lo demostramos como dos reglas admisibles, una para cada lado

$$\frac{}{\neg_R \neg_R \neg_R A \vdash_I \neg_R A} E_{\neg_R \neg_R \neg_R} \qquad \frac{}{\neg_R A \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A} I_{\neg_R \neg_R \neg_R}$$

Demostración. Primero $I_{\neg_R \neg_R \neg_R}$

$$\frac{\frac{\neg_R A, \neg_R \neg_R A \vdash_I \neg_R \neg_R A}{\neg_R A, \neg_R \neg_R A \vdash_I R} Ax \quad \frac{\neg_R A, \neg_R \neg_R A \vdash_I \neg_R A}{\neg_R A \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A} E_{\neg_R}}{I_{\neg_R \neg_R \neg_R}}$$

Ahora $E_{\neg_R \neg_R \neg_R}$

$$\frac{\frac{\neg_R \neg_R \neg_R A, A \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A}{\neg_R \neg_R \neg_R A, A \vdash_I R} Ax \quad \frac{\frac{\frac{\Gamma \vdash_I \neg_R A}{\Gamma = \neg_R \neg_R \neg_R A, A, \neg_R A \vdash_I R} Ax \quad \frac{\Gamma \vdash_I A}{\neg_R \neg_R \neg_R A, A \vdash_I \neg_R A} E_{\neg_R}}{E_{\neg_R}}}{I_{\neg_R \neg_R \neg_R}}$$

□

Teorema 10 (Traducción de Friedman para fórmulas Σ_1^0). Sea Π una demostración clásica de $\exists x.A$, y A una fórmula atómica. Si tenemos

$$\Gamma \vdash_C \exists x.A,$$

podemos generar una demostración intuicionista de *la misma fórmula*

$$\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \exists x.A.$$

Demostración. Aplicando la traducción, tenemos que

$$\begin{aligned} & (\Pi \triangleright \Gamma \vdash_C \exists x.A)^{\neg\neg} \\ & \quad \Updownarrow \\ & \Pi^{\neg\neg} \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \forall x. \neg_R \neg_R \neg_R A \end{aligned}$$

luego, tomando $R = \exists x.A$ la fórmula que buscamos probar,

$$\begin{aligned} & \Pi^{\neg\neg} \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \forall x. \neg_R \neg_R \neg_R A \\ \iff & \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \forall x. \neg_R A & (\text{Lema 2}) \\ = & \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I (\forall x. (A \rightarrow R)) \rightarrow R & (\neg_R A = A \rightarrow R) \\ = & \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I (\forall x. (A \rightarrow \exists x.A)) \rightarrow \exists x.A & (R = \exists x.A) \\ \Rightarrow & \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \exists x.A & (\text{Obs. 2}) \end{aligned}$$

En deducción natural,

$$\frac{\frac{\frac{\frac{\Gamma^{\neg\neg}, A \vdash_I A}{\Gamma^{\neg\neg}, A \vdash_I R = \exists x.A} \text{Ax}}{\Gamma^{\neg\neg}, A \vdash_I R = \exists x.A} \text{I}\exists}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A} \text{I}\rightarrow}{\frac{\frac{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A} \text{cut, I}\neg_R \neg_R \neg_R}{\frac{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \forall x \neg_R A^{\neg\neg}} \text{I}\forall} \text{E}\rightarrow} \frac{\Pi^{\neg\neg} \quad \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \forall x \neg_R A^{\neg\neg}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \exists x.A}$$

□

Obs. En la demostración del **Teorema 10** y las de esta sección, luego de aplicar la traducción de Friedman, todas las demostraciones generadas deben ser intuicionistas para que sigan siendo constructivas.

Obs. 2. $\vdash_I \forall x(A \rightarrow \exists x.A)$. Trivialmente, para cualquier x si vale A entonces va a existir un x tal que valga A .

Teorema 11 (Traducción de Friedman para fórmulas Π_2^0 atómicas). Sea Π una demostración clásica de $\forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x.A(x, y_1, \dots, y_n)$ y $A(\dots)$ una fórmula atómica

Si tenemos

$$\Gamma \vdash_C \forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x.A(x, y_1, \dots, y_n),$$

podemos generar una demostración intuicionista de la misma fórmula

$$\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x.A(x, y_1, \dots, y_n).$$

Demostración. Lo demostramos en deducción natural para un solo \forall . Para una cantidad arbitraria es análoga y fácilmente generalizable a partir de esta. La estrategia consiste en primero introducir el \forall reemplazando su variable por una fresca, para evitar conflictos con las variables usadas en la demostración original. Luego se procede a demostrar el \exists de forma análoga al [Teorema 10](#), usando traduciendo la demostración original pero tomando R como el \exists con la variable ligada por el \forall reemplazada por la fresca en lugar de la fórmula original.

Tomando $R = \exists x.A(x, y_0)$ y aplicando la traducción, tenemos que

$$\begin{aligned} & (\Pi \triangleright \Gamma \vdash_C \forall y \exists x. A(x, y))^{''} \\ & \quad \Updownarrow \\ & \Pi^{''} \triangleright \Gamma^{''} \vdash_I \forall y \neg_R \forall x. \neg_R \neg_R \neg_R A(x, y) \end{aligned}$$

Luego

$$\frac{\frac{\frac{\Pi^{''}}{\Gamma^{''} \vdash_I \forall y \neg_R \forall x. \neg_R A(x, y_0)^{''}} E\forall \quad \frac{\frac{\frac{\frac{\Gamma^{''}, A(x, y_0) \vdash_I A(x, y_0)}{Ax} \quad \frac{\Gamma^{''}, A(x, y_0) \vdash_I R = \exists x. A(x, y_0)}{I\exists} \quad \frac{\Gamma^{''} \vdash_I \neg_R A(x, y_0)}{I\rightarrow}}{\Gamma^{''} \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A(x, y_0)} \text{cut, } I\neg_R \neg_R \neg_R \quad \frac{\Gamma^{''} \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R A(x, y_0)}{\Gamma^{''} \vdash_I \forall x. \neg_R A(x, y_0)^{''}} I\forall}{\frac{\Gamma^{''} \vdash_I \exists x. A(x, y_0)}{\Gamma^{''} \vdash_I \forall y \exists x. A(x, y)} I\forall} E\rightarrow$$

□

Corolario 1 (Instanciación de \forall). El [Teorema 11](#) nos permite realizar la instanciación de las variables del \forall por cualquier término usando $E\forall$. De esa forma, la demostración final es sobre un \exists , requerido para poder hacer la extracción sobre la demostración normalizada. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} & (11) \\ & \frac{\Gamma^{''} \vdash_I \forall y \exists x. A(x, y)}{\Gamma^{''} \vdash_I \exists x. A(x, t)} E\forall \end{aligned}$$

Formulas no atómicas

Hasta ahora usamos la traducción de Friedman para traducir las demostraciones de una fórmula de clásica a intuicionista, manteniendo esa fórmula, siempre y cuando su subfórmula Σ_0^0 sea **atómica**. Pero queremos generalizarlo a fórmulas como $\forall y \exists x. \varphi(x, y)$ donde φ no sea atómica, por ejemplo $A(x) \wedge B(y)$. Para ello, la única diferencia es en el uso de cut. Para fórmulas atómicas, tenemos

$$\frac{\frac{\vdots}{\Gamma^{''} \vdash_I \neg_R A}}{\Gamma^{''} \vdash_I \neg_R A^{''} = \neg_R \neg_R \neg_R A^{''}} \text{cut, } I\neg_R \neg_R \neg_R$$

En donde aprovechamos que la traducción de fórmulas atómicas es $\neg_R A^{\neg\neg} = \neg_R \neg_R \neg_R A$ y podemos llevarla a $\neg_R A$ mediante la eliminación de la triple negación ($I\neg_R \neg_R \neg_R$). Pero esto no es así para fórmulas no atómicas. Para ello, enunciamos el **Lema 5**, el cual podemos usar para demostrar la traducción en el **Teorema 12**.

Lema 3 (Congruencia de $\neg_R \neg_R$). Si $A \vdash_I A'$, luego $\neg_R A \vdash_I \neg_R A'$.

Lema 4 (Distributividad del \neg_R sobre \wedge). $\neg_R A \vee \neg_R B \vdash_I \neg_R (A \wedge B)$

Lema 5 (Introducción de \neg_R). Para algunas fórmulas A , vale $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$ y lo notamos con la regla admisible $I(\neg_R \cdot \neg\neg)$.

No vale siempre, ya que en ese caso podríamos usar la traducción de Friedman para todas las fórmulas. Lo demostramos para las fórmulas descritas por la siguiente gramática (conjunciones y fórmulas atómicas)

$$A ::= \perp \mid \top \mid p(t_1, \dots, t_n) \mid A \wedge A$$

donde t_i son términos

Demostración. La demostración es por inducción estructural en la fórmula.

- \perp, \top son triviales. Predicados con $I\neg_R \neg_R \neg_R$.
- $\neg, \vee, \rightarrow, \exists, \forall$ no están demostradas. Debería ser posible para algunas, pero no es claro.
- \wedge es cierta para sub-fórmulas que cumplan con la hipótesis inductiva. Tiene algunos trucos.

Veamos esquemáticamente la demostración del \wedge .

- Debemos probar $\neg_R (A \wedge B) \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}$
- Intuitivamente, queremos llevarlo a $\neg_R (A \wedge B) \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg}$. Pero esta demostración requiere el uso de $E\neg$ para razonar por el absurdo, que no es cierto para lógica intuicionista (la demostración de esta equivalencia de De Morgan es clásica).
- Pero podemos usar un truco para razonar por el absurdo.
 - Tenemos que $\neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}$ es siempre equivalente a $\neg_R \neg_R (\neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg})$ por eliminación de triple negación.
 - Podemos usar dos lemas auxiliares: $\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}$ (4) y la congruencia de la doble negación, que al ser doble es covariante: $A \vdash_I A' \Rightarrow \neg_R \neg_R A \vdash_I \neg_R \neg_R A'$ (3) para demostrar

$$\neg_R \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg}) \vdash_I \neg_R \neg_R (\neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg})$$

- Esto nos permite llevar $\neg_R (A \wedge B) \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}$ a

$$\neg_R (A \wedge B) \vdash_I \neg_R \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg})$$

que se puede demostrar por el absurdo de forma análoga a la demostración clásica bien conocida.

En deducción natural,

$$\begin{array}{c}
 \vdots \\
 (dem\ por\ el\ absurdo) \\
 \frac{\frac{\overline{\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}} \quad (4)}{\neg_R \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg}) \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}} \quad (3) \quad \frac{\Gamma, \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg}) \vdash_I R}{\Gamma \vdash_I \neg_R \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \vee \neg_R B^{\neg\neg})} \quad I \rightarrow}{\frac{\Gamma \vdash_I \neg_R \neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}}{\Gamma = \neg_R (A \wedge B) \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}} \quad cut, E_{\neg_R \neg_R \neg_R}} \quad cut
 \end{array}$$

□

Teorema 12 (Traducción de Friedman para fórmulas Σ_1^0 en general). Sea Π una demostración clásica de $\forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n)$, y $\varphi(x, y_1, \dots, y_n)$ una fórmula no atómica. Si tenemos

$$\Gamma \vdash_C \forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n),$$

podemos generar una demostración intuicionista de la misma fórmula

$$\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n).$$

Demostración. Al igual que el **Teorema 11** lo demostramos para un solo \forall . La demostración es análoga con la diferencia del uso del **Lema 5**: $I(\neg_R \cdot \neg\neg)$. En lugar de tener

$$\begin{array}{c}
 \vdots \\
 \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A \\
 \hline
 \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} = \neg_R \neg_R \neg_R A^{\neg\neg} \quad cut, I_{\neg_R \neg_R \neg_R}
 \end{array}$$

tenemos

$$\begin{array}{c}
 \vdots \\
 \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \varphi \\
 \hline
 \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \varphi^{\neg\neg} \quad cut, I(\neg_R \cdot \neg\neg)
 \end{array}$$

□

Corolario 2 (Traducción de Friedman con instanciación de \forall). De la misma forma que el **Corolario 1**, podemos usar el **Teorema 12** para tener la **versión final de la traducción**, que deja las demostraciones listas para la extracción de testigos.

Sea Π una demostración clásica de $\forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n)$. Si tenemos

$$\Gamma \vdash_C \forall y_1 \dots \forall y_n. \exists x. \varphi(x, y_1, \dots, y_n),$$

podemos generar una demostración intuicionista de la misma fórmula instanciando las variables cuantificadas universalmente por términos t_1, \dots, t_n cualquiera (a elección del usuario)

$$\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \exists x. \varphi(x, t_1, \dots, t_n).$$

5.4.4. Traducción de demostraciones

Ya vimos como podemos usar la traducción de Friedman para, dada una traducción de la demostración, usarla para demostrar la misma fórmula en lógica intuicionista. Pero aún no ahondamos en un detalle importante. En el **Teorema 9** se introduce la necesidad de extender la traducción de doble negación relativizada de fórmulas a demostraciones, para poder realizar la traducción de una demostración clásica a intuicionista. En esta sección lo vemos más en detalle.

La conversión se efectúa por inducción estructural en la demostración. Para cada regla de inferencia que demuestra A , se genera una demostración a partir de ella para demostrar $A^{\neg\neg}$. La estrategia para hacerlo es similar para todas: usar la hipótesis inductiva para convertir las sub-demostraciones, y usarlas para generar la nueva demostración. Pero hay algunas un poco rebuscadas.

- $I\wedge$ (**Lema 6**), $E\wedge_1$, $E\wedge_2$, $I\rightarrow$, $E\rightarrow$, $I\vee_1$, $I\vee_2$, $I\vee$, $E\vee$, $I\neg$, $E\neg$, IT , Ax son todas similares entre sí, por lo que solo mostramos una.
- $I\exists$ (**Lema 7**) es una regla simple pero más interesante que las anteriores, por la traducción de \exists .
- **LEM** (**Lema 8**) es sumamente interesante, ya que se encuentra en el corazón de la traducción: ¿cómo traducimos el principio de razonamiento clásico que lo separa de la lógica intuicionista?
- $E\perp$ (**Lema 9**) se prueba como lema por inducción estructural en la fórmula a demostrar.
- $E\vee$ (**Lema 11**) y $E\exists$ son análogos y requieren un truco: usar la eliminación de la doble negación. Si bien al ser un principio de razonamiento clásico no vale para lógica intuicionista (por ser equivalente a **LEM**), lo que si vale es la eliminación de la doble negación relativizada: $E\neg_R\neg_R$ (**Lema 10**).

Lema 6 (Traducción de $I\wedge$). Dada una aparición de la regla $I\wedge$,

$$\frac{\frac{\Pi_A}{\Gamma \vdash_I A} \quad \frac{\Pi_B}{\Gamma \vdash_I B}}{\Gamma \vdash_I A \wedge B} I\wedge$$

es posible traducirla generando una demostración de $(A \wedge B)^{\neg\neg} = A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}$.

Demostración. Por hipótesis inductiva, tenemos que

$$\begin{aligned} \Pi_A^{\neg\neg} &\triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \\ \Pi_B^{\neg\neg} &\triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I B^{\neg\neg} \end{aligned}$$

Luego, podemos generar una demostración de $A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}$

$$\frac{\frac{\Pi_A^{\neg\neg}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg}} \quad \frac{\Pi_B^{\neg\neg}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I B^{\neg\neg}}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}} I\wedge$$

□

Lema 7 (Traducción de \exists). Dada una aparición de la regla \exists ,

$$\frac{\frac{\Pi}{\Gamma \vdash A\{x := t\}}}{\Gamma \vdash \exists x.A} \exists$$

es posible traducirla generando una demostración de $\exists x.A^{\neg\neg} = \neg_R \forall x. \neg_R A^{\neg\neg}$.

Demostración. Por hipótesis inductiva, tenemos que

$$\Pi^{\neg\neg} \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I (A\{x := t\})^{\neg\neg}$$

Luego, podemos generar una demostración de $\neg_R \forall x. \neg_R A^{\neg\neg}$

$$\frac{\frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R \forall x A^{\neg\neg}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R (A\{x := t\})^{\neg\neg}} \text{Ax}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R (A\{x := t\})^{\neg\neg}} \text{E}\forall \quad \frac{\Pi^{\neg\neg}}{\Gamma_1 \vdash_I (A\{x := t\})^{\neg\neg}} \text{E}\rightarrow}{\frac{\Gamma_1 = \Gamma^{\neg\neg}, \forall x. \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I R}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \forall x. \neg_R A^{\neg\neg}} \text{I}\rightarrow} \text{E}\rightarrow$$

□

Lema 8 (Traducción de LEM). Dada una aparición de la regla LEM,

$$\frac{}{\Gamma \vdash A \vee \neg A} \text{LEM}$$

es posible traducirla generando una demostración de

$$(A \vee \neg A)^{\neg\neg} = \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}).$$

Demostración. Como no hay HI, podemos demostrarlo para cualquier contexto Γ .

$$\frac{\frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}} \text{Ax}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}} \text{E}\wedge_2 \quad \frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}} \text{Ax}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}} \text{E}\wedge_1}{\frac{\Gamma_1 = \Gamma, \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I R}{\Gamma \vdash_I \neg_R (\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R \neg_R A^{\neg\neg})} \text{I}\rightarrow} \text{E}\rightarrow$$

□

Lema 9 (Traducción de $\text{E}\perp$). Dada una aparición de la regla $\text{E}\perp$,

$$\frac{\frac{\Pi_\perp}{\Gamma \vdash \perp}}{\Gamma \vdash \varphi} \text{E}\perp$$

es posible generar una demostración de $\varphi^{\neg\neg}$ a partir de $\perp^{\neg\neg} = R$.

Demostración. Por hipótesis inductiva (de inducción estructural sobre la demostración), tenemos que

$$\begin{array}{c}
 (\Pi_{\perp} \triangleright \Gamma \vdash_C \perp)^{\neg\neg} \\
 \Updownarrow \\
 \Pi_{\perp}^{\neg\neg} \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \perp^{\neg\neg} \\
 \Updownarrow \\
 \Pi_R \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I R
 \end{array}$$

Pero no es posible demostrar de forma directa $\varphi^{\neg\neg}$ a partir de R . Lo hacemos por inducción estructural en φ . Todos los casos son parecidos. Por ejemplo, veamos un caso inductivo y uno base.

- Dada una conjunción $A \wedge B$, su traducción es $A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}$. Por HI (de inducción estructural sobre la fórmula) a partir de Π_R podemos probar $A^{\neg\neg}$ al igual que $B^{\neg\neg}$. Luego,

$$\frac{\begin{array}{c} \text{(HI)} \\ \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I B^{\neg\neg} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{(HI)} \\ \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \end{array}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}} I\wedge$$

- Dada una disyunción $A \vee B$, su traducción es $\neg_R(\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg})$. Luego, podemos demostrarlo sin usar la HI.

$$\frac{\begin{array}{c} \Pi_R \\ \Gamma^{\neg\neg}, \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg} \vdash_I R \end{array}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R(\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg})} I\rightarrow$$

El resto de los casos son análogos. □

Lema 10 (Eliminación de doble negación relativizada). Para toda fórmula A , vale

$$\neg_R \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg}.$$

Y se define como regla admisible $E\neg_R \neg_R$.

Demostración. Se demuestra por inducción estructural en la estructura de A (sin traducir).

- \perp, \top son triviales.
- Predicados, \neg, \exists, \forall son todas iguales: como su traducción comienza por \neg_R , su doble negación es una triple negación, y se puede demostrar con el **Lema 2 (Eliminación de triple negación relativa)**.
- $\wedge, \rightarrow, \forall$ mantienen su forma luego de la traducción, y su demostración usa la misma técnica. Veamos por ejemplo el caso de la conjunción $A \wedge B$. Por HI tenemos que

$$\begin{array}{c}
 \neg_R \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \\
 \neg_R \neg_R B^{\neg\neg} \vdash_I B^{\neg\neg}
 \end{array}$$

Luego, introducimos la conjunción y usamos la hipótesis inductiva en cada una para razonar por el absurdo. Esto es análogo a como usamos $E\neg\neg$ para razonar por el absurdo en lógica clásica en el **Lema 1 (Razonamiento por el absurdo)**.

$$\frac{\Pi_L \quad \Pi_R}{\frac{\neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \quad \neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I B^{\neg\neg}}{\neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg}}}$$

donde Π_L y Π_R son simétricas, y

$$\begin{array}{c} \frac{\frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \text{ Ax} \quad \frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I A^{\neg\neg} \wedge B^{\neg\neg} \text{ Ax}}{\Gamma_1 \vdash_I A^{\neg\neg}} \text{ E}\wedge_1}{\Gamma_1 = \Gamma, (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I R} \text{ E}\rightarrow}{\Gamma \vdash_I \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}} \text{ I}\rightarrow}{\Gamma \vdash_I \neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \text{ Ax}} \text{ E}\rightarrow \\ \frac{\Gamma = \neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg}, \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I R}{\neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}} \text{ I}\rightarrow \\ \Pi_L = \frac{\neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R A^{\neg\neg}}{\neg_R \neg_R (A \wedge B)^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg}} \text{ cut, (HI)} \end{array}$$

□

Lema 11 (Traducción de EV). Dada una aparición de la regla EV,

$$\frac{\Pi_V \quad \Pi_L \quad \Pi_R}{\frac{\Gamma \vdash A \vee B \quad \Gamma, A \vdash C \quad \Gamma, B \vdash C}{\Gamma \vdash C} \text{ EV}}$$

podemos usarla para demostrar $C^{\neg\neg}$ a partir de las sub-demostraciones traducidas.

Demostración. Por HI, tenemos

$$\begin{array}{l} \Pi_V^{\neg\neg} \triangleright \Gamma^{\neg\neg} \vdash_I (A \vee B)^{\neg\neg} = \neg_R(\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg}) \\ \Pi_L^{\neg\neg} \triangleright (\Gamma, A)^{\neg\neg} \vdash_I C^{\neg\neg} \\ \Pi_R^{\neg\neg} \triangleright (\Gamma, B)^{\neg\neg} \vdash_I C^{\neg\neg} \end{array}$$

Luego, podemos generar una demostración de $C^{\neg\neg}$ por el absurdo usando $\text{E}\neg_R \neg_R$ (Lema 10).

$$\frac{\frac{\Pi_V^{\neg\neg} \quad \Sigma}{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R(\neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg})} \text{ E}\rightarrow \quad \frac{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg}}{\frac{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I R}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R C^{\neg\neg}} \text{ I}\rightarrow} \text{ E}\rightarrow \\ \frac{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R \neg_R C^{\neg\neg}}{\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I C^{\neg\neg}} \text{ cut, E}\neg_R \neg_R$$

Donde

$$\Sigma = \frac{\frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R C^{\neg\neg} \text{ Ax} \quad \Pi_L^{\neg\neg}}{\Gamma_1 = \Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg}, A^{\neg\neg} \vdash_I R} \text{ E}\rightarrow \quad \vdots}{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}} \text{ I}\neg \quad \frac{\vdots}{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R B^{\neg\neg}} \text{ I}\wedge}{\Gamma^{\neg\neg}, \neg_R C^{\neg\neg} \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg} \wedge \neg_R B^{\neg\neg}} \text{ I}\wedge$$

□

5.5. Normalización (o reducción)

Repasemos en dónde estamos parados. Queremos extraer un testigo de la demostración de un existencial (i.e extraer de una demostración de $\exists x.p(x)$ a un t tal que $p(t)$). Partimos de una demostración escrita en el lenguaje de alto nivel PPA, que se certifica a una demostración en deducción natural *clásica* (que tiene el problema para la reducción que no es constructiva). Mediante la traducción de Friedman, para cierto tipo de fórmulas (Π_2^0), podemos convertir la demostración a *intuicionista*. Ahora, queremos extraer el testigo a partir de ella. Eso lo podemos lograr **normalizando** la demostración. ¿Cómo funciona?

Intuitivamente, la estrategia que empleamos consiste en evitar *desvíos superfluos* en una demostración, sucesivamente simplificándolos hasta que queda una sin desvíos, que estará en **forma normal**. Por ejemplo, en la siguiente demostración se prueba $A \rightarrow A$ usando $(A \rightarrow A) \wedge (B \rightarrow B)$ y demostrando ambos por separado. Pero se puede demostrar de forma más directa, usando la demostración de $A \rightarrow A$ y eliminado el desvío por el \wedge .

$$\frac{\frac{\frac{}{A \vdash A} \text{Ax}}{\vdash A \rightarrow A} \text{I} \rightarrow \quad \frac{\frac{}{B \vdash B} \text{Ax}}{\vdash B \rightarrow B} \text{I} \rightarrow}{\vdash (A \rightarrow A) \wedge (B \rightarrow B)} \text{I} \wedge \quad \rightsquigarrow \quad \frac{\frac{}{A \vdash A} \text{Ax}}{\vdash A \rightarrow A} \text{I} \rightarrow}{\vdash A \rightarrow A} \text{E} \wedge_1$$

Fig. 5.5: Ejemplo de desvío y su normalización

Todos los desvíos que normalizamos se ven de esta forma: una **eliminación** seguida inmediatamente de su **introducción** correspondiente. Por ejemplo, $\text{E} \wedge_1$ seguida de $\text{I} \wedge$.

Este proceso es análogo a las reducciones de cálculo λ . Y no solo análogo, sino que existe un *isomorfismo* entre demostraciones en deducción natural y términos de cálculo λ : El isomorfismo Curry-Howard [SU10]. Con él, la normalización de demostraciones es el isomorfismo de las reducciones en cálculo λ , su semántica operacional. Por ejemplo, el isomorfismo nos permite pensar en una conjunción como una tupla, y las eliminaciones como proyecciones. Luego, podemos ver cómo la regla de normalización de la conjunción es isomorfa a la regla de reducción de las proyecciones.

$$\begin{aligned} \pi_1(\langle M_1, M_2 \rangle) &\rightsquigarrow M_1 \\ \pi_2(\langle M_1, M_2 \rangle) &\rightsquigarrow M_2 \end{aligned}$$

$$\frac{\frac{\frac{}{\Gamma \vdash A_1} \Pi_1 \quad \frac{}{\Gamma \vdash A_2} \Pi_2}{\Gamma \vdash A_1 \wedge A_2} \text{I} \wedge}{\Gamma \vdash A_i} \text{E} \wedge_i \quad \rightsquigarrow \quad \frac{\Pi_i}{\Gamma \vdash A_i}$$

Fig. 5.6: Relación entre conjunciones y tuplas

De acá en adelante presentamos las reducciones directamente en deducción natural, dado que es lo implementado en PPA. Usamos de forma intercambiable *reducción* y *normalización*, pues en el fondo, son lo mismo.

Obs. Es interesante notar que en las reducciones mencionadas en esta sección, no se explica ni \vdash_I ni \vdash_C a diferencia de la traducción de Friedman. Esto es porque la normalización se puede ejecutar en ambos casos, con la diferencia de que si lo hacemos para una demostración de lógica clásica que use LEM, se traba cuando llega ahí y su forma normal no es muy útil.

5.5.1. Sustituciones

No todas las reglas de reducción son igual de sencillas que \wedge . Veamos el caso de la implicación. Una eliminación seguida de una introducción tiene la siguiente forma.

$$\frac{\frac{\frac{\Pi_B}{\Gamma, h : A \vdash B} \text{I} \rightarrow_h}{\Gamma \vdash A \rightarrow B} \quad \frac{\Pi_A}{\Gamma \vdash A} \text{E} \rightarrow}{\Gamma \vdash B} \text{E} \rightarrow$$

Para eliminar el desvío, uno podría estar tentado a hacer directamente $\Pi_B \triangleright \Gamma \vdash B$ pero **¡no sería correcto!** La demostración Π_B requiere la hipótesis $h : A$, que no necesariamente está en Γ , es agregada por $\text{I} \rightarrow_h$. Lo correcto sería usar Π_B , pero reemplazando todas las ocurrencias de la hipótesis h por la demostración Π_A . Es necesaria una noción de sustitución de *hipótesis* por demostraciones.

Def. 17 (Hipótesis libres). Una hipótesis ocurre libre en una demostración si se cita sin ser definida. Las reglas que etiquetan y agregan hipótesis al contexto son las que las ligan (i.e. las mencionadas en [Subsección 2.3.1 \(Hipótesis etiquetadas\)](#): Ax_h , $\text{I} \rightarrow_h$, $\text{I} \neg_h$, $\text{E} \vee_h$, $\text{E} \exists_h$)

Def. 18 (Hipótesis citadas por una demostración). Definimos el conjunto de hipótesis citadas por una demostración $\text{hyps}(\Pi)$ como todas las hipótesis ligadas y libres que aparecen en ella.

Def. 19 (Sustitución de hipótesis). Notamos como $\Pi\{h := \Pi'\}$ a la sustitución sin capturas de todas las ocurrencias libres de una hipótesis h por una demostración Σ en otra demostración Π . Una *captura* ocurriría si en alguna sub-demostración de Π se liga una hipótesis $h_2 \neq h$ tal que $h_2 \in \text{hyps}(\Sigma)$ (se cite en Σ).

Para evitar la captura, al igual que en la sustitución de variables, no podemos renombrar en Σ (porque la hipótesis está “libre”), sino que en la sub-demostración de Π que liga h_2 introduciendo el conflicto la renombramos por una fresca h'_2 .

(DUDA: Pensamiento: Si no tuvieramos etiquetas, esta sustitución sería más fácil, no? Porque en lugar de reemplazar por ocurrencias de la etiqueta, reemplazas por veces que citas en un axioma una *fórmula*, entonces si lo estás capturando te da igual, total es la misma fórmula. O se podrá romper?)

Además, para la reducción del \exists y \forall , necesitaremos extender la sustitución usual de variables por términos ([Def. 8](#)) a demostraciones. La implementación es análoga, evitando capturas y haciéndolo en una pasada de forma lineal.

Def. 20 (Sustitución de variables en demostraciones). Notamos como $\Pi\{x := t\}$ a la sustitución sin capturas de todas las ocurrencias libres de una variable x por un término t en toda una demostración Π . Incluyendo los contextos.

(DUDA: Hace falta definirlo más?)

$$\begin{array}{c}
\frac{\frac{\Pi_1}{\Gamma \vdash A_1} \quad \frac{\Pi_2}{\Gamma \vdash A_2}}{\Gamma \vdash A_1 \wedge A_2} I\wedge \quad \rightsquigarrow \quad \frac{\Pi_i}{\Gamma \vdash A_i} E\wedge_i \\
\\
\frac{\frac{\Pi_B}{\Gamma, h : A \vdash B} I\rightarrow_h \quad \frac{\Pi_A}{\Gamma \vdash A}}{\Gamma \vdash B} E\rightarrow \quad \rightsquigarrow \quad \left(\frac{\Pi_B}{\Gamma, h : A \vdash B} \right) \{h := \Pi_A\} \\
\text{(DUDA: Por qué no directamente así? } \frac{\Pi_B \{h := \Pi_A\}}{\Gamma \vdash B} \text{)} \\
\\
\frac{\frac{\Pi_{A_i}}{\Gamma \vdash A_i} IV_i \quad \frac{\frac{\Pi_1}{\Gamma, h_1 : A_1 \vdash B} \quad \frac{\Pi_2}{\Gamma, h_2 : A_2 \vdash B}}{\Gamma \vdash B} E\vee}{\rightsquigarrow \quad \left(\frac{\Pi_i}{\Gamma, h_i : A_i \vdash B} \right) \{h_i := \Pi_{A_i}\}} \\
\\
\frac{\frac{\Pi_{\perp}}{\Gamma, h : A \vdash \perp} I\neg \quad \frac{\Pi_A}{\Gamma \vdash A}}{\Gamma \vdash \perp} E\neg \quad \rightsquigarrow \quad \left(\frac{\Pi_{\perp}}{\Gamma, h : A \vdash \perp} \right) \{h := \Pi_A\} \\
\\
\frac{\frac{\Pi}{\Gamma \vdash A} IV \quad \frac{\Pi}{\Gamma \vdash \forall x.A} E\forall}{\Gamma \vdash A\{x := t\}} \rightsquigarrow \quad \left(\frac{\Pi}{\Gamma \vdash A} \right) \{x := t\} \\
\\
\frac{\frac{\Pi_A}{\Gamma \vdash A\{x := t\}} I\exists \quad \frac{\Pi_B}{\Gamma, h : A \vdash B}}{\Gamma \vdash B} \rightsquigarrow \quad \left(\left(\frac{\Pi_B}{\Gamma, h : A \vdash B} \right) \{x := t\} \right) \{h := \Pi_A\}
\end{array}$$

Fig. 5.7: Reglas de reducción

5.5.2. Algoritmo de reducción

A partir de todas las reglas de reducción (Figura 5.7), dado que son *pasos* que acercan la demostración sucesivamente a su versión normalizada, podemos implementarlo de forma análoga a DNF (Sección 4.4.3) como la clausura reflexiva transitiva de la reducción en un paso: aplicarla 0 o más veces hasta que esté en forma normal. Al igual que DNF, también necesitaremos reglas de congruencia: si no hay una eliminación de una introducción para simplificar, se trata de reducir recursivamente las sub-demostraciones.

En una primera implementación las sub-demostraciones las reducíamos en un paso, de izquierda a derecha. Por ejemplo, si teníamos una introducción de una conjunción, reducíamos de a un paso a la vez $A \rightsquigarrow A_1 \rightsquigarrow A_2 \rightsquigarrow \dots \rightsquigarrow A^*$ hasta llegar a A^* irreducible y luego, lo mismo para B .

$$\frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I\wedge$$

Esto resultó demasiado lento, dado que las demostraciones que reducimos son muy grandes (al ser generadas automáticamente), y si por ejemplo la sub-demostración que había que reducir estaba muy anidada, había que recorrerla toda para efectuar cada paso.

$$\frac{\frac{\Gamma \vdash A \quad \Gamma \vdash B}{\Gamma \vdash A \wedge B} I\wedge}{\vdots} \Pi$$

Además, las demostraciones eran de mayor profundidad por una mayor cantidad de iteraciones del algoritmo, lo que hacía que realizar sustituciones también sea costoso (pues hay que recorrer el árbol entero para ver las hipótesis citadas y realizar la sustitución).

Para solucionar este problema, implementamos una reducción en muchos pasos. En la literatura se pueden encontrar muchas *estrategias de reducción* alternativas, que se clasifican en si reducen en un paso o muchos para cada iteración de la clausura. Dentro de las de muchos, la que implementamos fue **Gross-Knuth**, que reduce en muchos pasos todos los sub-términos posibles al mismo tiempo. Aplicado a demostraciones, quiere decir que en un único paso de reducción, al mismo tiempo reduciríamos $A \wedge B \rightsquigarrow A^* \wedge B^*$. Esto hace que la convergencia sea mucho más rápida.

(DUDA: Probablemente falta rigurosidad en esta sección.)

5.5.3. Limitaciones

Implementamos una reducción sencilla, que solamente reduce eliminaciones de introducciones de la misma regla. Pero hay otros patrones que dejamos afuera, que si ocurren, no nos permitirán llegar a una forma normal. Entonces no siempre podremos extraer un testigo. Por ejemplo, en Figura 5.8 (Ejemplo de demostración no normalizada), se puede observar una demostración sencilla que usa **cases**. Pero al certificarla, traducirla y reducirla, no queda en una forma normal. Se repite dos veces $I\exists$, cuando se podría mover hacia la raíz del árbol y evitar repetirlo en cada rama del EV. Esto hace que al intentar de extraer un testigo, el programa reporte una falla al no poder normalizar la demostración. Para soportar estos casos es necesario sofisticar la reducción, agregando otro tipo de reglas, que quedó fuera del alcance del trabajo.

(a) Programa de PPA

```

1  axiom ax_1: p(k) | q(k)
2  axiom ax_2: p(k) -> r(k)
3  axiom ax_3: q(k) -> r(k)
4
5  theorem t: exists Y . r(Y)
6  proof
7    take Y := k
8    cases by ax_1
9      case p(k)
10        hence r(k) by ax_2
11
12      case q(k)
13        hence r(k) by ax_3
14    end
15 end

```

(b) Demostración certificada, traducida y reducida (generada por PPA)

$$\frac{\frac{}{\Gamma \vdash_I p(k) \vee q(k)} \text{Ax} \quad \frac{\Pi_L \quad \Gamma, p(k) \vdash_I \exists y.r(y)}{\Gamma \vdash_I \exists y.r(y)} \quad \frac{\Pi_R \quad \Gamma, q(k) \vdash_I \exists y.r(y)}{\Gamma \vdash_I \exists y.r(y)} \text{E}\vee}{\Gamma \vdash_I \exists y.r(y)} \text{E}\vee$$

con Π_L definido de la siguiente forma, y Π_R simétrico.

$$\Pi_L = \frac{\frac{\frac{}{\Gamma, p(k) \vdash_I p(k) \rightarrow r(k)} \text{Ax} \quad \frac{}{\Gamma, p(k) \vdash_I p(k)} \text{Ax}}{\Gamma, p(k) \vdash_I r(k)} \text{I}\rightarrow}{\Gamma, p(k) \vdash_I \exists y.r(y)} \text{I}\exists$$

(c) Demostración en forma normal (deseada)

$$\frac{\frac{\frac{}{\Gamma \vdash_I p(k) \vee q(k)} \text{Ax} \quad \frac{\Pi_L \quad \Gamma, p(k) \vdash_I r(y)}{\Gamma \vdash_I r(k)} \text{I}\rightarrow \quad \frac{\Pi_R \quad \Gamma, q(k) \vdash_I r(k)}{\Gamma \vdash_I r(k)} \text{I}\rightarrow}{\Gamma \vdash_I \exists y.r(y)} \text{I}\exists \text{E}\vee$$

con Π_L y Π_R análogas al caso anterior, pero sin $\text{I}\exists$.

Fig. 5.8: Ejemplo de demostración no normalizada

5.6. Manteniendo el contexto

Describimos todo el proceso de cómo a partir de una demostración en PPA, se certifica, se traduce mediante Friedman y se reduce para extraer testigos de un existencial. Pero falta exponer un detalle fundamental. Cuando estábamos probando la integración de todas las partes, nos dimos cuenta de un problema. PPA implementa el resultado del [Corolario 2 \(Traducción de Friedman con instanciación de \$\forall\$ \)](#), que nos permite llevar las demostraciones

a esta forma

$$\Gamma^{\neg\neg} \vdash_I \exists x. \varphi(x, t_1, \dots, t_n).$$

Pero si tenemos por ejemplo el programa de la [Figura 5.1 \(Extracción simple\)](#),

```

1 axiom ax: p(v)
2 theorem t: exists X . p(X)
3 proof
4   take X := v
5   thus p(v) by ax
6 end

```

Al certificarlo y traducirlo, la demostración resultante es válida **con el contexto traducido**. Este está conformado por los axiomas, entonces la demostración traducida es de

$$\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I \exists x. p(x)$$

que al reducirlo, queda

$$\frac{\frac{\frac{}{\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{Ax} \quad \frac{\frac{\frac{}{\neg_R \neg_{Rp}(v), p(v) \vdash_I p(v)} \text{Ax} \quad \frac{}{\neg_R \neg_{Rp}(v), p(v) \vdash_I R = \exists x. p(x)} \text{I}\exists}{\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I R = \exists x. p(x)} \text{I}\rightarrow}{\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{Ax} \quad \frac{}{\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{I}\rightarrow}{\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I \exists x. p(x)} \text{E}\rightarrow$$

¡Nunca llega a la forma normal deseada! Conceptualmente, para que exista la forma normal debería poder comenzar con $\text{I}\exists$ y demostrar de alguna forma $\neg_R \neg_{Rp}(v) \vdash_I p(v)$, que no es posible. Otra forma más práctica de verlo es que con las reglas que definimos no se puede reducir, porque se elimina una implicación que se demuestra mediante Ax de un axioma en vez de $\text{I}\rightarrow$, por lo que se traba.

Esto es análogo al problema que tendríamos si intentamos normalizar la demostración de un teorema que cita a otros, sin insertar las demostraciones de ellos. Cuando llega a la cita como axioma, se queda trabado.

(DUDA: Qué intuición agregar del problema? Algo de que el contenido computacional de los axiomas es limitado?)

La solución que implementamos fue **mantener los axiomas originales**, y demostrar la introducción de la traducción ([Lema 12](#), regla $\text{I}^{\neg\neg}$): $p(v) \vdash_I p(v)^{\neg\neg}$. En la demostración traducida, se reemplaza cada cita al axioma (que pretende encontrar el axioma traducido) por la demostración de la traducción a partir del axioma original.

$$\frac{\frac{\frac{}{p(v) \vdash_I p(v)} \text{Ax} \quad \frac{}{p(v) \vdash_I R = \exists x. p(x)} \text{I}\exists}{p(v) \vdash_I R = \exists x. p(x)} \text{I}\rightarrow \quad \frac{}{p(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{I}^{\neg\neg}}{\frac{}{p(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{I}^{\neg\neg} \quad \frac{}{p(v) \vdash_I \neg_R \neg_{Rp}(v)} \text{I}\rightarrow}{p(v) \vdash_I \exists x. p(x)} \text{E}\rightarrow$$

De esa forma, como los axiomas se mantienen, existe la forma normal que buscamos y nuestra reducción llega a ella para este caso.

$$\frac{\frac{}{p(v) \vdash_I p(v)} \text{Ax}}{p(v) \vdash_I \exists x. p(x)} \text{I}\exists$$

Lema 12 (Introducción de la traducción $\neg\neg$). Vale $A \vdash_I A^{\neg\neg}$. Pero no para todas las fórmulas [Sel92]. Lo demostramos para las descritas por la siguiente gramática.

$$\begin{aligned} A &::= \perp \mid \top \mid p(t_1, \dots, t_n) \mid A \wedge A \\ B &::= p(t_1, \dots, t_n) \mid \perp \mid \top \\ &\quad \mid B \wedge B \mid B \vee B \\ &\quad \mid \forall x.B \mid \exists x.B \\ &\quad \mid A \rightarrow B \\ &\quad \mid \neg A \end{aligned}$$

Esto es suficientemente permisivo para los axiomas que se suelen definir. Veremos que B son las fórmulas que cumplen $B \vdash_I B^{\neg\neg}$ (este lema) y B las que cumplen $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$ (Lema 5)

Demostración. Se demuestra por inducción estructural en la fórmula (sin traducir).

- Los casos de predicados, $\top, \perp, \vee, \wedge, \forall, \exists$ salen directo.
- \neg y \rightarrow son las rebuscadas. Al ser contra variantes, no se pueden demostrar de forma directa porque no alcanza con la HI, sino que es necesario $A^{\neg\neg} \vdash_I A$ que en general no vale. Pero si es posible reducirlo a $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$ (Lema 5).

La negación es la más sencilla

$$\frac{\frac{\frac{\neg A, A \vdash_I \neg A}{\text{Ax}} \quad \frac{\neg A, A \vdash_I A}{\text{Ax}}}{\neg A, A \vdash_I R} \text{E}\perp}{\frac{\neg A \vdash_I \neg_R A}{\neg A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}} \text{I}\rightarrow} \text{cut, I}(\neg_R \cdot \neg\neg)$$

La implicación no tanto. Veamos la estrategia.

- Debemos probar $A \rightarrow B \vdash_I A^{\neg\neg} \rightarrow B^{\neg\neg}$.
- Lo vamos a reducir a demostrar los contrarecíprocos con cut

$$\neg_R B \rightarrow \neg_R A \vdash_I \neg_R B^{\neg\neg} \rightarrow \neg_R A^{\neg\neg}$$

Para ello necesitamos los siguientes lemas, sencillos de demostrar.

- $A \rightarrow B \vdash_I \neg_R B \rightarrow \neg_R A$
- $\neg_R B^{\neg\neg} \rightarrow \neg_R A^{\neg\neg} \vdash_I A^{\neg\neg} \rightarrow B^{\neg\neg}$ (requiere $\text{E}\neg_R \neg_R$)
- Reducimos a $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$ para el antecedente y usamos la HI para el consecuente ($B \vdash_I B^{\neg\neg}$) y concluimos.

$$\frac{\frac{\frac{\frac{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R B \rightarrow \neg_R A}{\text{Ax}} \quad \frac{\frac{\frac{\Gamma_1, B \vdash_I \neg_R B^{\neg\neg}}{\Gamma_1, B \vdash_I B^{\neg\neg}} \text{Ax}}{\Gamma_1, B \vdash_I R} \text{I}\rightarrow}}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R B} \text{E}\rightarrow}{\Gamma_1 \vdash_I \neg_R A} \text{cut, I}(\neg_R \cdot \neg\neg)} \text{I}\rightarrow$$

□

Corolario 3 (Compleitud). Vimos que el **Lema 12** (Introducción de la traducción $\neg\neg$), $A \vdash_I A^{\neg\neg}$, se reduce al **Lema 5** (Introducción de \neg_R), $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$. En [Sel92] se exhibe un contra ejemplo para $A \vdash_I A^{\neg\neg}$ (en una versión distinta pero equivalente de la traducción de Friedman): $\neg\neg A$.

Como el primero se reduce al segundo, si el primero no vale, entonces el segundo en general no puede valer. Y esto es consistente con nuestros resultados, dado que tampoco pudimos demostrar $\neg\neg A$ pues no es generada por la gramática definida en el **Lema 12**.

5.7. Otros métodos de extracción

Hay dos categorías a grandes rasgos de extracción testigos de demostraciones en lógica clásica, o en realidad, de formas de interpretarla computacionalmente: directas e indirectas [Miq11]. Las indirectas traducen las demostraciones clásicas de un subconjunto de fórmulas a otras lógicas como lineal o intuicionista, aprovechando el hecho de que la intuicionista es constructiva y tiene una interpretación computable a través del isomorfismo Curry-Howard. Esta traducción se puede hacer con diferentes tipos de traducciones negativas, como la traducción de Friedman, que es lo que hicimos en este trabajo.

Por otro lado, también se puede hacer de forma directa, dando una interpretación computable de la lógica clásica. A esto se le llama *realizabilidad clásica*, que consiste en dar una semántica operacional para cálculos λ clásicos.

6. LA HERRAMIENTA ppa

En el [Capítulo 3 \(El lenguaje PPA\)](#) vimos a PPA como un lenguaje, desde el punto de vista de un usuario. En [Capítulo 4 \(El certificador de PPA\)](#) abordamos el funcionamiento interno, que expandimos en [Capítulo 5 \(Extracción de testigos de existenciales\)](#) con extracción de testigos. En este capítulo presentamos la herramienta de línea de comandos `ppa`, que permite procesar programas del lenguaje. Está implementada en Haskell.

6.1. Instalación

Para instalar `ppa` a partir de los fuentes, seguir los siguientes pasos.

1. Instalar [Haskell](#), [Cabal](#)
2. Clonar el repositorio de `ppa` o descargarlo <https://github.com/mnPanic/tesis>
3. Instalar la herramienta con `cabal`

```
tesis/ppa:~$ cabal install ppa
```

4. Verificar la instalación

```
tesis/ppa:~$ ppa version
ppa version 0.1.0.0
```

6.2. Interfaz y ejemplos

El ejecutable `ppa` cuenta con dos comandos: `check` (certificado y chequeo de programas) y `extract` (extracción de testigos). En el repositorio de los fuentes, el directorio `ppa/doc/examples` contiene ejemplos de programas. La extensión por convención de programas de `ppa` es `.ppa`.

6.2.1. `check` - Chequeo de programas

Permite certificar y chequear programas.

```
ppa check <in> <args>
```

Argumentos:

- El primer argumento posicional es el archivo que contiene el programa a certificar. Puede ser `-` para leer de *stdin*.
- `-out`, `-o` (*opcional*): Path para el archivo al cual escribir el certificado (con el sufijo `_raw.nk`) o `-` para usar *stdout*.

Primero lee, certifica y chequea el programa reportando el resultado. En caso de haber proporcionado un archivo de output, escribe el certificado de deducción natural a `<path>_raw.nk`.

Ejemplos:

```
$ ppa check doc/examples/parientes.ppa
Checking... OK!
```

```
$ ppa check doc/examples/parientes.ppa --out out
Checking... OK!
Writing...
Wrote raw to out_raw.nk
```

6.2.2. **extract** - Extracción de testigos

Permite ejecutar la extracción de testigos.

```
ppa extract <in> <args>
```

Argumentos:

- El primer argumento posicional es el archivo de entrada que contiene el programa. Puede ser - para leer de *stdin*.
- **-theorem**, **-t** (*obligatorio*): el nombre del teorema para el cual extraer el testigo
- **-terms**, **ts**: la lista de términos que indica cómo instanciar las variables cuantificadas universalmente. Debe contener la misma cantidad de términos que variables.
- **-out**, **-o** (*opcional*): Path para el archivo al cual escribir los certificados (con los sufijos *_raw.nk* y *.nj*) o - para usar *stdout*.

Primero lee y certifica, y chequea el programa. Luego, lo traduce con la traducción de Friedman, normaliza la demostración e intenta extraer un testigo, reportando cual fue el testigo extraído y cómo queda el término final con el testigo y los términos proporcionados para instanciar las variables cuantificadas universalmente.

Por ejemplo, si tenemos el programa de [Figura 5.2](#)

```
$ ppa extract doc/listings/extract/forall.ppa --theorem t --terms x
Running program... OK!
Translating... OK!
Checking translated... OK!
Extracted witness: v
of formula: p(x, v)
```

Y especificando output,

```
$ ppa extract doc/listings/extract/forall.ppa --theorem t --terms x -o out
Running program... OK!
Translating... OK!
Writing...
Wrote raw to out_raw.nk
Wrote translated+reduced to out.nj
Checking translated... OK!
Extracted witness: v
of formula: p(x, v)
```

6.3. Detalles de implementación

En esta sección contamos algunos detalles relevantes sobre la implementación, que deberían permitir navegar los fuentes para ver cómo fue implementado. Comencemos por la arquitectura de los módulos.

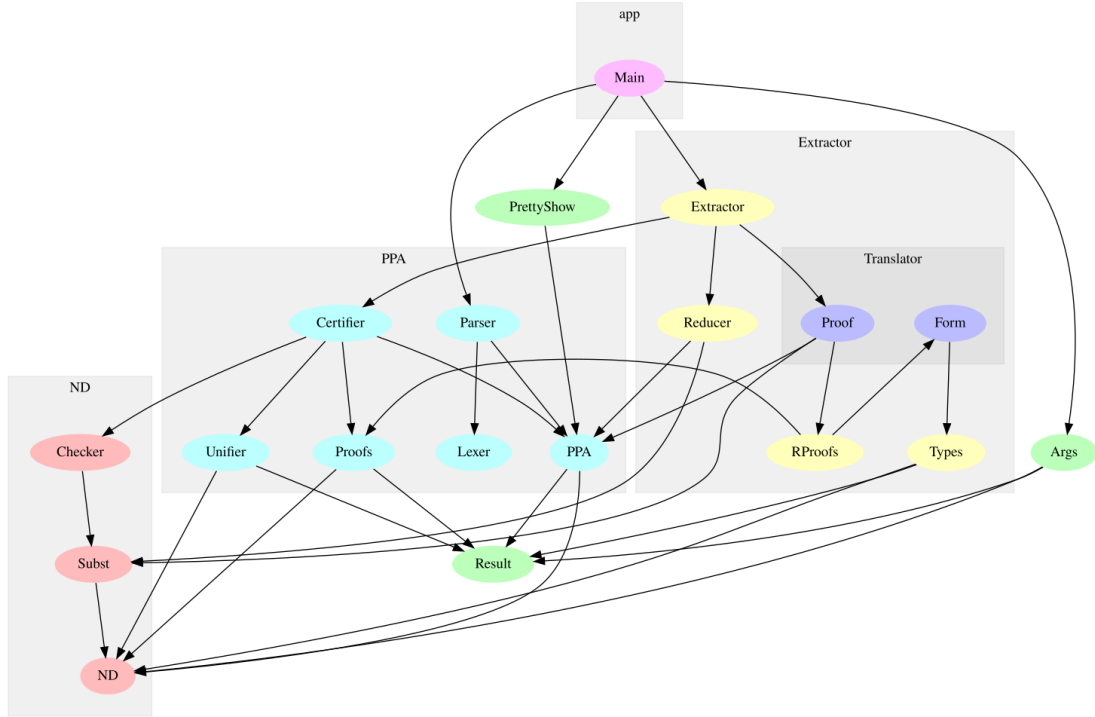


Fig. 6.1: Grafo de módulos del programa `ppa` generado con `graphmod`

Los más relevantes son,

- **ND:** Contiene el modelo central de deducción natural usado para los certificados. Fórmulas, términos y demostraciones. Tiene 3 sub módulos: `ND.Checker` (chequeador de demostraciones), `ND.Subst` (sustituciones sobre fórmulas y demostraciones) y `ND.ND` (el modelo en sí). Ver [Subsección 6.3.2 \(Modelado de deducción natural\)](#).
- **PPA:** Contiene la implementación del lenguaje PPA por sobre deducción natural.
 - `PPA.Parser` y `PPA.Lexer` son el lexer y el parser respectivamente. Ver [Subsección 6.3.1 \(Parser y Lexer\)](#).
 - `PPA.Certifier` implementa el certificador, que genera demostraciones de deducción natural a partir de programas de PPA. Usa `PPA.Unifier` para unificación (usado en eliminación de \forall) y `PPA.Proofs` para demostraciones de equivalencias en ND (usado en DNF).
- **Extractor:** Contiene la lógica de extracción de testigos. Tiene varios sub módulos
 - `Extractor.Translator` implementa la traducción de Friedman en sus dos sub-módulos, `Extractor.Translator.Proof` para demostraciones y `Extractor.Translator.Form` para fórmulas.

- `Extractor.Reducer` implementa la normalización.
- `Extractor.Extractor` combina todo lo anterior para hacer la extracción de testigos de principio a fin, certificando, traduciendo y reduciendo. Usa `Extractor.RProofs` que es análogo a `PPA.Proofs` e implementa los lemas necesarios sobre demostraciones intuicionistas con negación relativizada.

6.3.1. Parser y Lexer

Una parte esencial de `ppa` es el compilador, que permite tomar un programa desde un archivo de texto y llevarlo a una representación estructurada, como un tipo abstracto de datos, para el uso en el resto del programa. Se implementa en dos etapas.

- La primera es el análisis léxico o *lexer*, que convierte el texto plano en una lista de *lexemas* o *tokens*. Se puede implementar con expresiones regulares.
- Una vez que el programa ya fue convertido en *lexemas*, es procesado por el parser, que interpreta las estructuras sintácticas del lenguaje. Puede generar una representación intermedia como un tipo abstracto de datos.

Para el parsing en general hay dos caminos bien conocidos. O bien hacerlo a mano con alguna biblioteca de *parser combinators* como `parsec`, o usar un *parser generator*: un programa que genere un parser automáticamente a partir de una gramática en algún formato como EBNF. Nosotros decidimos, por familiaridad con el proceso, usar un parser generator. Los más conocidos históricamente son Lex (para el lexer) y Yacc (para el parser, *yet another compiler compiler*). En Haskell existen dos paquetes análogos: `Alex` para el lexer y `Happy` para el parser. Estos generan un lexer a partir de expresiones regulares y un parser respectivamente a partir de una gramática en un formato similar a EBNF.

En la [Figura 6.2](#) se puede ver un extracto del archivo de input de Alex y en [Figura 6.3](#) uno del de Happy de `ppa`. La implementación del parser solo construye términos de programas (definidos en `PPA.PPA`) y fórmulas (`ND.ND`) a partir de los cuales el programa opera.

6.3.2. Modelado de deducción natural

La parte más interesante del modelado son las demostraciones de deducción natural, que se pueden ver en la [Figura 6.6](#). Una demostración está compuesta por la aplicación recursiva de reglas de inferencia, y su modelo omite todos los detalles que se pueden inferir durante su chequeo. De esa forma las demostraciones son más fáciles de escribir y generar, al costo de ser un poco más costosas de leer por un humano, cosa que de todas formas no deberíamos hacer. Por ejemplo, la introducción de la implicación, $I \rightarrow$, modelada por `PImpI` no especifica cuál es la implicación que se está introduciendo, dado que durante el chequeo debería ser la fórmula actual a demostrar. Tampoco se explicita en cada regla, cual es el contexto de demostración. Se genera de forma dinámica.

```

tokens :-
  $white+                                ;
  "//".*                                ; -- comments
  "/*"(.|(\r\n|\r|\n))*"/"              ; -- block comments

  \.                                     { literal TokenDot }
  \,                                     { literal TokenComma }
  \&                                    { literal TokenAnd }
  \|                                    { literal TokenOr }
  true                                  { literal TokenTrue }
  false                                 { literal TokenFalse }
  \->                                   { literal TokenImp }
  \<\->                                 { literal TokenIff }
  \~                                    { literal TokenNot }
  exists                               { literal TokenExists }
  forall                               { literal TokenForall }
  \(                                   { literal TokenParenOpen }
  \)                                   { literal TokenParenClose }
  axiom                               { literal TokenAxiom }
  theorem                             { literal TokenTheorem }
  proof                               { literal TokenProof }
  end                                  { literal TokenEnd }
  \;                                   { literal TokenSemicolon }
  \:                                   { literal TokenDoubleColon }
  suppose                             { literal TokenSuppose }
  thus                                { literal TokenThus }
  hence                               { literal TokenHence }
  have                                { literal TokenHave }
  then                                { literal TokenThen }
  by                                  { literal TokenBy }
  equivalently                        { literal TokenEquivalently }
  claim                               { literal TokenClaim }
  cases                               { literal TokenCases }
  case                                { literal TokenCase }
  take                                { literal TokenTake }
  \:=                                  { literal TokenAssign }
  st                                  { literal TokenSuchThat }
  consider                            { literal TokenConsider }
  let                                  { literal TokenLet }

  \"[^\"]*\"                            { lex (TokenQuotedName . firstLast) }

  (\_|[A-Z])[a-zA-Z0-9_\-]*(\')*         { lex TokenVar }
  [a-zA-Z0-9_\-\\?!\#$\%*\+\<\>=\?\@^\']+(\')* { lex TokenId }

```

Fig. 6.2: Extracto del lexer de ppa

```

%token
  -- Enumeración de tokens del lexer

Prog      : Declarations

Declarations : Declaration Declarations
            | Declaration

Declaration : Axiom
            | Theorem

Axiom : axiom Name ':' Form

Theorem : theorem Name ':' Form proof Proof end

Proof      : ProofStep Proof
            | {- empty -}

ProofStep : suppose Name ':' Form
            | thus Form OptionalBy
            | hence Form OptionalBy
            | have Name ':' Form OptionalBy
            | then Name ':' Form OptionalBy
            | equivalently Form
            | claim Name ':' Form proof Proof end
            | cases OptionalBy Cases end
            | take var ':'= Term
            | let var
            | consider var st Name ':' Form by Justification

Cases      : Case Cases
            | {- empty -}

Case       : case Form Proof
            | case Name ':' Form Proof

OptionalBy : by Justification
OptionalBy : {- empty -}

Justification : Name ',' Justification
              | Name

Name          : id
              | name

```

Fig. 6.3: Extracto del parser de **ppa** (programas)

```

-- Resolución automática de conflictos shift/reduce
%right exists forall dot
%right imp iff
%left and or
%nonassoc not
%%

Form    : id TermArgs
        | Form and Form
        | Form or Form
        | Form imp Form
        | Form iff Form
        | not Form
        | exists var dot Form
        | forall var dot Form
        | true
        | false
        | '(' Form ')'

Term     : var
        | id TermArgs

TermArgs : {- empty -}
        | '(' Terms ')'

Terms    : Term
        | Term ',' Terms

```

Fig. 6.4: Extracto del parser de ppa (lógica de primer orden)

```

type VarId = String
type FunId = String
type PredId = String
type HypId = String

data Term
= TVar VarId
| TMetavar Metavar
| TFun FunId [Term]

data Form
= FPred PredId [Term]
| FAnd Form Form
| FOr Form Form
| FImp Form Form
| FNot Form
| FTrue
| FFalse
| FForall VarId Form
| FExists VarId Form

```

Fig. 6.5: Modelado de fórmulas y términos de LPO

```

data Proof =
| PAX HypId
| PAndI
  { proofLeft :: Proof
  , proofRight :: Proof
  }
| PAndE1
  { right :: Form
  , proofAnd :: Proof
  }
| PAndE2
  { left :: Form
  , proofAnd :: Proof
  }
| POrI1
  { proofLeft :: Proof
  }
| POrI2
  { proofRight :: Proof
  }
| POrE
  { left :: Form
  , right :: Form
  , proofOr :: Proof
  , hypLeft :: HypId
  , proofAssumingLeft :: Proof
  , hypRight :: HypId
  , proofAssumingRight :: Proof
  }
| PImpI
  { hypAntecedent :: HypId
  , proofConsequent :: Proof
  }
| PImpE
  { antecedent :: Form
  , proofImp :: Proof
  , proofAntecedent :: Proof
  }
| PNotI
  { hyp :: HypId
  , proofBot :: Proof
  }
| PNotE
  { form :: Form
  , proofNotForm :: Proof
  , proofForm :: Proof
  }
| PTrueI
| PFalseE
  { proofBot :: Proof
  }
| PLEM
| PForallI
  { newVar :: VarId
  , proofForm :: Proof
  }
| PForallE
  { var :: VarId
  , form :: Form
  , proofForall :: Proof
  , termReplace :: Term
  }
| PExistsI
  { inst :: Term
  , proofFormWithInst :: Proof
  }
| PExistsE
  { var :: VarId
  , form :: Form
  , proofExists :: Proof
  , hyp :: HypId
  , proofAssuming :: Proof
  }

```

Fig. 6.6: Modelado de reglas de inferencia para demostraciones

7. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos el lenguaje PPA junto con los detalles de su implementación en **ppa**. Primero dimos una definición completa del sistema lógico de deducción natural, junto con ejemplos de demostraciones de una teoría de estudiantes. Se presentan también algunos ajustes que tuvimos que hacer al sistema para implementarlo: etiquetado de hipótesis (y cómo afecta eso a las reglas de inferencia) y relajamiento de restricciones sobre variables libres en el contexto. Describimos cómo implementamos los algoritmos de chequeo, alfa equivalencia de forma lineal y sustitución sin capturas de forma lineal.

Dimos un manual de usuario para el lenguaje PPA, explicando como escribir demostraciones y cómo usar el mecanismo de demostración principal **by**. Damos una demostración completa que extiende el ejemplo de estudiantes y muestra diferentes capacidades del lenguaje. También se listan todos los comandos, ejemplos funcionales para cada uno, y su relación con las reglas de inferencia de deducción natural. Profundizamos en la implementación del certificador y cómo están implementadas cada una de las partes de la interfaz. Centralmente el *solver* usado por debajo del **by**.

Finalmente vimos una implementación posible de eliminación de testigos existenciales. Mencionamos las limitaciones al tratar de hacerlo de forma directa sobre lógica clásica, las distintas versiones de la traducción de Friedman según el tipo de fórmula a demostrar, y las limitaciones que se presentaron (no se podrá asumir cualquier axioma, ni demostrar cualquier fórmula Π_2^0). Luego describimos cómo a partir del isomorfismo Curry-Howard pudimos implementar un mecanismo de normalización de demostraciones, que también presentó limitaciones (no todas las demostraciones podrán ser llevadas a su forma normal) y requirió cambios en la estrategia de reducción de una sencilla a una más sofisticada (Gross-Knuth) debido al tamaño de las demostraciones.

El principal aporte del trabajo es la implementación práctica de un método de extracción directo mediante el uso de la traducción de Friedman y la normalización usual de la lógica intuicionista.

7.1. Trabajo futuro

Surgieron varias líneas de trabajo futuro, que quedaron fuera del alcance de la tesis. Las listamos a continuación.

- **Modelar de forma nativa inducción e igualdad:** las teorías que se pueden axiomatizar están limitadas al no poder representar inducción de forma nativa (como predica sobre predicados, es lógica de segundo orden). Si se puede axiomatizar de forma adhoc, como predicados escritos a mano en cada programa, pero sería más amigable de estar como regla de inferencia y a lo largo de todo el programa. También se podría agregar de forma nativa la noción de *igualdad*.
- **Sofisticar *solver* del **by**:** en [Subsección 4.4.6 \(Poder expresivo\)](#) se mencionan las limitaciones del *solver* usado por el **by**. Una funcionalidad que quedó afuera pero sería sencilla de agregar es que no solo se busque eliminar los \forall consecutivos de una hipótesis, sino que el proceso sea recursivo: que exhaustivamente intente de eliminar los \forall de todas las combinaciones de hipótesis posibles.
- **Mejorar a PPA como lenguaje de programación:** el lenguaje PPA no brinda soporte para tener un ecosistema. Se pueden agregar muchas funcionalidades que mejorarían la calidad de vida del desarrollador como permitir importar archivos o módulos e implementar una biblioteca estándar de teorías y teoremas.

- **Refinar demostración usada para traducción:** en la traducción de Friedman introducimos dos lemas centrales: $B \vdash_I B^{\neg\neg}$ **Lema 12 (Introducción de la traducción $\neg\neg$)**, y $\neg_R A \vdash_I \neg_R A^{\neg\neg}$ **Lema 5 (Introducción de \neg_R)**. El primero se reduce al segundo. El segundo no vale siempre, pero demostramos un subconjunto de todas las demostraciones válidas. Podríamos refinarlo aún más, lo que permitiría usar más clases de axiomas para las demostraciones que se quiera extraer testigos.
- **Implementar versión completa de reducción de demostraciones:** en **Subsección 5.5.3 (Limitaciones)** vimos una demostración para la que no se puede llegar a una forma normal, evitando la extracción de testigos en un caso en el que debería ser posible. Se podría extender la implementación de la reducción para incluir más tipos de reglas, así haciendo que sea completa.
- **Mejorar reporte de errores:** los errores reportados por la herramienta en general son muy rústicos, implementativos y de bajo nivel. Se podrían hacer más amigables y accionables, ayudando a resolver problemas sin saber cómo funciona internamente la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

- [AF98] Jeremy Avigad y Solomon Feferman. «Godel’s Functional Interpretation». En: *Handbook of proof theory*. Ed. por Samuel R. Buss. Elsevier, 1998, págs. 337-405. URL: <https://philpapers.org/rec/FEF0FD>.
- [Bau] Andrej Bauer. *Constructive gem: irrational to the power of irrational that is rational*. <https://math.andrej.com/2009/12/28/constructive-gem-irrational-to-the-power-of-irrational-that-is-rational/>.
- [BW05] Henk Barendregt y Freek Wiedijk. «The challenge of computer mathematics». En: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363.1835 (sep. de 2005), págs. 2351-2375. ISSN: 1471-2962. DOI: [10.1098/rsta.2005.1650](https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1650). URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2005.1650>.
- [Gen35] Gerhard Gentzen. «Untersuchungen über das logische Schließen. I». En: *Mathematische Zeitschrift* 39.1 (dic. de 1935), págs. 176-210. ISSN: 1432-1823. DOI: [10.1007/BF01201353](https://doi.org/10.1007/BF01201353). URL: <https://doi.org/10.1007/BF01201353>.
- [Miq11] Alexandre Miquel. «Existential witness extraction in classical realizability and via a negative translation». En: *Log. Methods Comput. Sci.* 7.2 (2011). DOI: [10.2168/LMCS-7\(2:2\)2011](https://doi.org/10.2168/LMCS-7(2:2)2011). URL: [https://doi.org/10.2168/LMCS-7\(2:2\)2011](https://doi.org/10.2168/LMCS-7(2:2)2011).
- [Par] Rohit Parikh. «Church’s theorem and the decision problem». En: *Routledge Encyclopedia of Philosophy*. Routledge. ISBN: 9780415250696. DOI: [10.4324/9780415249126-y003-1](https://doi.org/10.4324/9780415249126-y003-1). URL: <http://dx.doi.org/10.4324/9780415249126-y003-1>.
- [Sel92] Peter Selinger. «Friedman’s A-Translation». En: (1992). URL: <https://www.mscs.dal.ca/~selinger/papers/papers/friedman.pdf>.
- [SU10] Morten Sørensen y Paweł Urzyczyn. «Lectures on the Curry-Howard Isomorphism». En: *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics* 149 (oct. de 2010). DOI: [10.1016/S0049-237X\(06\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0049-237X(06)80005-4). URL: <https://disi.unitn.it/~bernardi/RSISE11/Papers/curry-howard.pdf>.
- [Wie] Freek Wiedijk. *Mathematical Vernacular*. <https://www.cs.ru.nl/~freek/notes/mv.pdf>.